Über die Belastbarkeit von frei ausgespannten Drähten verschiedenen Materials bei verschiedenen Temperaturen.

Von der
Technischen Hochschule zu Breslau
zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte
Dissertation.

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Gerhard Haebler
aus Freiwaldau.

Referent: Prof. Dr.-Ing. Gg. Hilpert.
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. K. Euler.
Tag der mündlichen Prüfung: 22. Nov. 1929.

Über die Belastbarkeit von frei ausgespannten Drähten verschiedenen Materials bei verschiedenen Temperaturen.

Von der
Technischen Hochschule zu Breslau
zur
Erlangung der Würde eines Doktor-Ingenieurs
genehmigte
Dissertation.

Vorgelegt von
Dipl.-Ing. Gerhard Haebler
aus Freiwaldau.

Referent: Prof. Dr.-Ing. Gg. Hilpert.
Korreferent: Prof. Dr.-Ing. K. Euler.
Tag der mündlichen Prüfung: 22. Nov. 1929.

Druck von Adalbert Reif in Dresden-Leuben

R. UNIV.
BIBLIOTHEEK
LEIDEN

Meinen Eltern

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41545807_0096

INHALTSVERZEICHNIS.

Seite

A. Einleitung 9

B. Abhandlung 10

I. Die Messung 10
1. Die Anordnung des Versuchsdrahtes 10
2. Längenmessung 11
3. Dickenmessung 11
4. Messung des Ausdehnungskoeffizienten 12
5. Widerstandsmessung 14
6. Temperaturmessung 20
a) Thermoelement 20
b) Messung mittels Pyrometer 27
7. Strommessung 28

II. Die Temperaturverteilung am frei ausgespannten Versuchsdrahte 28

III. Die chemische Zusammensetzung des Versuchsmaterials 31
1. Aluminium 31
2. Eisen 31
3. Kupfer 32
4. Nickelin 32
5. Reinnickel 32
6. Silber 32
7. Zinn 32

IV. Ergebnisse der Messung 33
1. Erwärmungskurven 33
2. Ergebnisse der Messung des Ausdehnungskoffizienten 42
a) Aluminium 42
b) Eisen 42
c) Kupfer 42
d) Nickelin 42
e) Reinnickel 42
f) Silber 43
g) Zinn 43
3. Ergebnisse der Widerstandsmessung 43

V. Ergebnisse der Rechnung 45
1. Berechnung der abgegebenen Watt/cm² 45
2. Diskussion der Ergebnisse der Rechnung 48
3. Koeffizienten und Exponenten 59
a) Aluminium 59
b) Eisen 60
c) Kupfer 61
d) Nickelin 61

e) Reinnickel 62
f) Silber 63
g) Zinn 63
4. Die Nomogramme 64
5. Über die allgemeine Gültigkeit der aufgestellten Gleichungen und Nomogramme 74

VI. Versuche am vertikal ausgespannten Drahte und an der Drahtspirale 74
1. Der vertikal ausgespannte Draht 74
2. Die Drahtspirale 77

VII. Ältere Arbeiten 79

VIII. Einfluß der Oxydation 81
1. Kupfer 82
2. Nickelin 89
3. Reinnickel 91
4. Eisen 92
5. Aluminium, Silber, Zinn 94
6. Schlußbetrachtung über die Oxydation 94

C. Zusammenfassung 95

D. Verzeichnis der benutzten Symbole 96

E. Literaturverzeichnis 98

F. Verzeichnis der Abbildungen 99

A. EINLEITUNG.

Wird ein Draht in vollkommen ruhiger Luft elektrisch erwärmt, so findet (abgesehen von der Wärmeabführung durch die Klemmvorrichtung) eine Wärmeabgabe von dem heißeren Draht an die kältere Luft statt.

Die Wärmeabgabe des erhitzten Drahtes an die, ihn umgebende Luft, setzt sich zusammen aus der:

1. Wärmeleitung und Konvektion,
2. Wärmestrahlung.

Unter Wärmeleitung verstehen wir im engeren Sinne der Bedeutung des Wortes nur den unmittelbaren Wärmeübergang, der in der Richtung abnehmender Temperatur von der Oberfläche eines erhitzten Drahtes an die unmittelbar benachbarten Luftteilchen erfolgt.

Treten Strömungen in der umgebenden Luft auf, so wird durch die dauernde Abführung der warmen und Zuführung der kalten Luft ein größerer Wärmebetrag abgeführt als bei ruhender Luft. Dieser Mehrbetrag ist ein Maß für den Einfluß der Konvektion. Werden diese Luftströmungen künstlich erzeugt, so spricht man von künstlicher Konvektion, entstehen dieselben durch den Auftrieb der erwärmten Luft und das dadurch bedingte Nachströmen kalter Luft, so spricht man von natürlicher Konvektion. Da der Versuchsraum durch Abdichten von Luftströmungen praktisch frei gemacht worden war, haben wir es in dieser Arbeit nur mit der natürlichen Konvektion zu tun.

Während die Wärmeleitung und Konvektion an das Vorhandensein eines Gasmediums gebunden sind, da sie durch Berührung mit dem erhitzten Körper zustandekommen, ist die Wärmestrahlung davon unabhängig. Der Betrag der Wärmestrahlung ist bei sonst gleichen Verhältnissen von der, den strahlenden Körper umgebenden Lufthülle unabhängig.

Für die Praxis ist es von großem Interesse, einen Zusammenhang zwischen dem Belastungsstrom I, der Beharrungstemperatur t und den gesamten pro cm^2 Oberfläche eines frei ausgespannten Drahtes in Luft abgegebenen Watt W zu kennen.

In dieser Arbeit wird dieser Zusammenhang auf Grund einer großen Anzahl von Versuchen für Aluminium, Eisen, Kupfer, Nickelin, Reinnickel, Silber, Zinn hergestellt (Angaben über die chemische Zusammensetzung der Versuchsmaterialien siehe S. 31—32) und durch Bestimmung von graphischen Rechentafeln (Nomogrammen) in eine für die Praxis geeignete, einfache und genaue Form gebracht. Die Versuche wurden bis in die Nähe des Schmelzpunktes der einzelnen Materialien durchgeführt. Deshalb wurde es notwendig, in einem besonderen Abschnitt dieser Arbeit den Einfluß der Oxydation auf die gesamte Wärmeabgabe eines in Luft erwärmten Drahtes zu untersuchen.

B. ABHANDLUNG.

I. Die Messung.

1. Die Anordnung des Versuchsdrahtes.

Für die Anordnung des Versuchsdrahtes sind zwei Möglichkeiten vorhanden:

1. die horizontale Aufhängung,
2. die vertikale Aufhängung.

Die horizontale Aufhängung bietet durch ihre gleichmäßigen Abkühlungsverhältnisse und durch ihre, zur Mitte des Drahtes symmetrische Temperaturverteilung den Vorteil großer Regelmäßigkeit. Die Hauptversuche dieser Arbeit wurden deshalb am horizontal ausgespannten Versuchsdrahte vorgenommen. Aus Gründen der Vollständigkeit und vor allem um Vergleiche der einzelnen Messungen untereinander zu ermöglichen, wurden einige Versuchsreihen mit vertikaler Anordnung des Versuchsdrahtes (S. 74) und vertikal aufgehängten Drahtspiralen (S. 77) ausgeführt.

Gemessen wurden für jeden Draht und jedes Material die im Beharrungszustande und pro cm^2 Oberfläche abgegebenen Watt W in Abhängigkeit von der Beharrungstemperatur t.

Aus W wird im Abschnitt V. 2 (S. 48) durch Rechnung ein Zusammenhang zwischen dem Belastungsstrom I und der Beharrungstemperatur t hergestellt.

Der Beharrungszustand stellt sich ein, wenn die dem Versuchsdrahte zugeführte elektrische Energie gleich der abgeführten Wärmeenergie ist, das heißt t = constans wird.

Die gesamte Oberfläche des Drahteinsatzes in cm^2 ist:

$$F = l \cdot d \cdot \pi.$$

Es ist also zu messen:

1. die Länge l in cm,
2. der Durchmesser d in cm.

Da sich durch die Erwärmung des Drahtes sowohl dessen Durchmesser als auch dessen Länge ändert, mußte auch

3. der Ausdehnungskoeffizient β für jedes Material bestimmt werden.

Die gesamten im Beharrungszustande abgestrahlten Watt/cm² bei der Temperatur t sind

$$W = I^2 \cdot R.$$

Weiterhin ist also zu bestimmen:

4. der Widerstand R in Ohm,
5. die Beharrungstemperatur t des Drahtes in °Celsius,
6. der Belastungsstrom I in Amp., durch den der Versuchsdraht erwärmt wird.

2. Längenmessung.

Da alle Versuche mit Drahteinsätzen ausgeführt wurden, die aus später zu erörternden Gründen länger als 0,5 m waren, wurde zur Längenmessung ein in Millimeter eingeteilter Normal-Maßstab aus Stahl (hergestellt und geeicht von der Maßindustrie G. m. b. H., Werdau, Sa.) von 1 m Länge benutzt. Der maximale Fehler des Maßstabes beträgt bei dieser Länge und Zimmertemperatur 0,1 mm.

Die Messung kleinster Längenunterschiede, wie sie durch die Wärmeausdehnung hervorgerufen werden, wurde mittels einer photographischen Methode (siehe S. 12) vorgenommen.

3. Dickenmessung.

Die Dickenmessung wurde mit dem Komparator von Zeiß ausgeführt, der eine genaue Messung des Durchmessers bis auf Tausendstel Millimeter und ein Abschätzen bis auf Zehntausendstel Millimeter gestattet. An jeder Meßstelle wurde die Messung an vier zueinander senkrechten Richtungen vorgenommen und als Endwert das Mittel aus diesen Ablesungen errechnet. Die Dickenmessung wurde an jedem Versuchsdraht an mehreren Stellen ausgeführt, um eine Kontrolle zu haben, ob der Durchmesser über die ganze Länge des Drahtes hinreichend konstant ist. Zu den Versuchen wurden nur diejenigen Drähte benutzt, deren Fehler durch Unrundheit, bezogen auf den Durchmesser des Drahtes, nicht größer als 0,1 % war.

Beispiel:

Ablesung:	2,3095	2,3090	2,3092	2,3089
Nullstellung:	**—1,1013**	**—1,1013**	**—1,1013**	**—1,1013**
Ergebnis:	1,2082	1,2076	1,2079	1,2076

Mittel: 1,2078 mm.

4. Messung des Ausdehnungskoeffizienten.

Der Ausdehnungskoeffizient β wurde auf photographischem Wege mittels des Vergrößerungsapparates von Zeiß bestimmt. Zu diesem Zwecke wurde ein Stück des Drahtes von dem zu untersuchenden Material vor dem Objektiv ausgespannt und durch den Strom I erwärmt. Die Beharrungstemperatur des Drahtes wurde durch den Belastungsstrom I aus der Erwärmungskurve $I = f(t)$ bestimmt, die auf Grund anderer Versuche (S. 33) aufgestellt worden war. Die Temperatur des Versuchsraumes war 20° C. Das Vergrößerungsverhältnis war bei allen Versuchen ungefähr 15fach. Es ändert sich mit jeder neuen Einstellung des Vergrößerungsapparates und wurde durch Photographieren eines geeichten Maßstabes (beigegeben von der Firma Zeiß) für jeden Versuch neu bestimmt. Zweckmäßig wurde so vorgegangen, daß für je einen Versuch (d. i. eine Gruppe von Messungen an demselben Metalldrahte bei verschiedenen Temperaturen) das Vergrößerungsverhältnis konstant gehalten wurde. Durch zwei kleine Reiter aus dünnstem Platindraht wurde ein Stück des Versuchsdrahtes (ungefähr 15—20 mm) abgegrenzt. Dieses Drahtstück wurde in X-facher Vergrößerung auf einer photographischen Platte 24 × 30 cm aufgenommen. Dann wurde der Versuchsdraht auf die Beharrungstemperatur t erwärmt und wieder photographiert. Auf diesem Wege gelang die Bestimmung der linearen Ausdehnung in mm/m in Abhängigkeit von der Temperatur. Aus diesen Werten wurde der Ausdehnungskoeffizient β errechnet.

Eine Schwierigkeit dieser Messung lag in der Konstanthaltung der Temperatur durch Vermeidung jedes Luftzuges. Selbst kleine Luftströmungen, wie sie durch Ausatmen von Luft oder durch Sprechen im Versuchsraum entstehen, reichten bei dünneren Drähten (unter 1,0 mm) aus, um in der Vergrößerung kleine Bewegungen des Drahtes auf der Mattscheibe, und damit Unschärfen bei der photographischen Aufnahme, hervorzurufen. Infolgedessen mußte die Belichtungszeit so kurz als möglich genommen werden, was dadurch erzielt wurde, daß hinter das zu photographierende Drahtstück eine Mattscheibe und hinter dieser eine lichtstarke Bogenlampe angeordnet wurde. Unter Benutzung von hochempfindlichen Platten

war es nun möglich, Momentaufnahmen zu machen. Die auf diesem Wege festgelegten Längen und Längenunterschiede wurden auf dem Zeißschen Komparator ausgemessen. Die Auswertung der Versuchsergebnisse wird im folgenden für Silber an einem Beispiel gezeigt:

Es bedeutet:

l_t = Länge des Drahtes in mm bei der Temperatur t. (Gemessen in der Vergrößerung!)

K = photographischer Vergrößerungsfaktor (z. B. für Silber K = 11,244).

$\triangle l$ = Längenänderung in mm

$$\begin{aligned} l_{20} &= 190{,}416 \text{ mm} \\ l_{775} &= 193{,}492 \text{ mm} \\ \hline \triangle l &= 3{,}076 \text{ mm} \end{aligned}$$

$$\triangle l : 1000 = \frac{l_{775} - l_{20}}{K} : \frac{l_{20}}{K}$$

$$\triangle l = \frac{1000 \cdot (l_{775} - l_{20})}{l_{20}} = \frac{1000\ (193{,}492 - 190{,}416)}{190{,}416} = \frac{3076}{190{,}416} = 16{,}155 \text{ mm/m}$$

Lineare Ausdehnung von Silber bei t = 775° C.

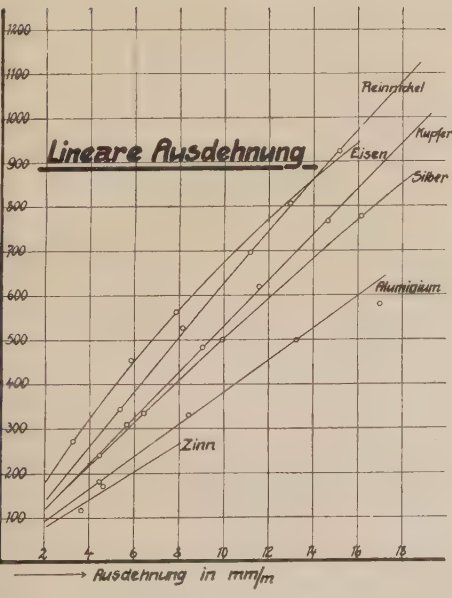


Abb. 1

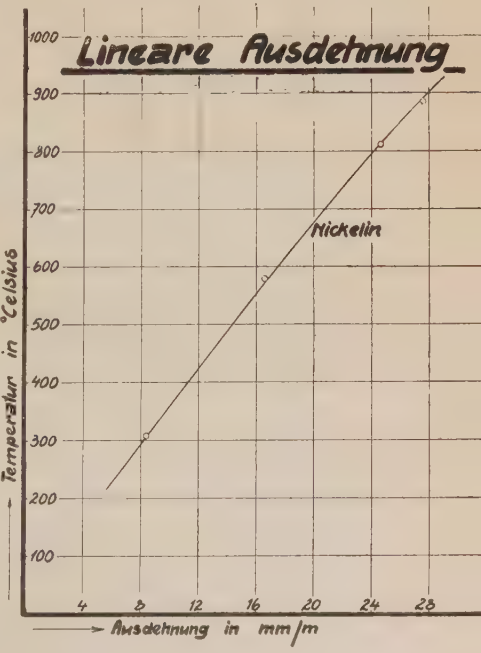


Abb. 2

Auf diesem Wege wurde für jedes untersuchte Material bei verschiedenen Temperaturen die lineare Ausdehnung in mm/m und daraus der Ausdehnungskoeffizient β bestimmt.

Die Ergebnisse der Messung sind für alle Versuchsmaterialien auf Abb. 1 und 2 dargestellt.

5. Widerstandsmessung.

Die Bestimmung des Widerstandes geschah durch Strom- und Spannungsmessung, wobei der Strom, mit dem der Drahteinsatz erwärmt wurde, gleichzeitig als Meßstrom für die Widerstandsmessung benutzt wurde (Abb. 3). Außerdem wurde auf dieselbe Weise für jedes Material eine Widerstandsbestimmung bei Zimmertempe-

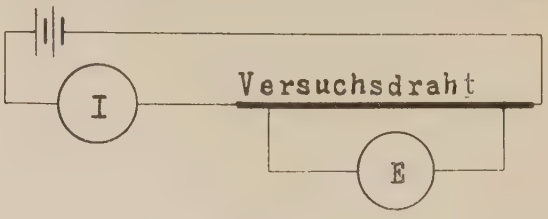


Abb. 3

ratur gemacht, wobei der Meßstrom so klein gehalten wurde, daß die Temperaturerhöhung des Drahtes zu vernachlässigen war. Die Spannungsklemmen wurden an stärkeren Versuchsdrähten bei Temperaturen bis 600° C hart angelötet, wobei beachtet wurde, daß die Lötstelle keine wesentliche Verdickung des Drahtes verursachte, um die Temperaturverhältnisse möglichst gleichmäßig zu erhalten. An dünnen Drähten und an den Metallen, die sich nicht oder nur schlecht löten ließen (Aluminium, Nickel) wurden die Spannungsklemmen mittels kleinster Klemmschrauben (Gewicht je ungefähr 0,5 Gramm) an dem Versuchsdrahte befestigt.

Um zu untersuchen, ob die Angaben des Voltmeters durch Thermospannungen nicht geändert werden, die möglicherweise durch die Anbringung der Spannungsklemmen auf dem Versuchsdrahte entstehen könnten, wurde der Versuchsdraht erhitzt, dann der Belastungsstrom abgeschaltet und an Stelle des Voltmeters ein empfindliches Millivoltmeter eingeschaltet. Dasselbe zeigte keinen Anschlag. Etwa vorhandene Thermokräfte scheinen sich demnach gegenseitig aufzuheben.

Um die unvermeidliche Temperatursenke an den Spannungszuführungsklemmen möglichst klein zu machen, wurden diese Anschlußklemmen beiderseits ungefähr 15 cm

von den Stromklemmen drahteinwärts befestigt. Während im Falle der Abb. 4 a die Spannungsklemmen nur von einer Seite erwärmt werden (nämlich vom Versuchsdraht), wird durch die Anordnung Abb. 4 b erreicht, daß die Erwärmung der Spannungszuführung vorteilhafter von beiden Seiten aus erfolgt. Die Temperatursenke ist also im Falle Abb. 4 b kleiner als bei Abb. 4 a.

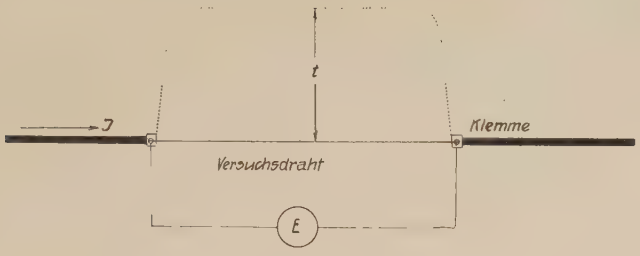


Abb. 4 a

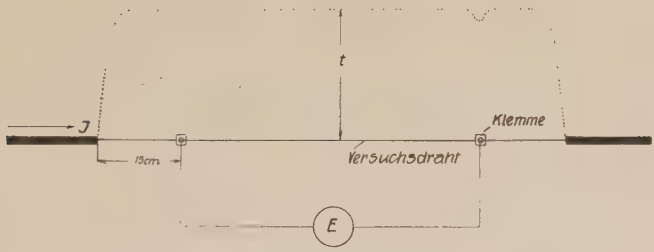


Abb. 4 b

Zur Strommessung wurde ein Weston-Millivolt- und Amperemeter für Gleichstrom (R = 2 Ohm) verwendet, dessen Meßbereich sich durch einen Dreh-Shunt in den Grenzen von 0,3 bis 300 Amp. verändern ließ. Die Spannungsmessung wurde mit einem Gleichstrom-Voltmeter von Siemens & Halske ausgeführt, das je einen Meßbereich zu 3, 15 und 30 Volt hatte. Da der Widerstand des Voltmeters gegenüber dem des Versuchsdrahtes sehr groß war (Meßbereich 3 Volt = 1000 Ohm), konnte die Stromkorrektur vernachlässigt werden. Beide Meßinstrumente waren vor Beginn der Messung geeicht worden. Jede Versuchsreihe wurde fünfmal gemacht und das Mittel aus den einzelnen Messungen als Ergebnis genommen.

Da die Temperatur nicht über die ganze Länge des Drahtes konstant ist, sondern sowohl in der Nähe der Spannungs- als auch der Stromklemmen infolge der Wärmeleitung niedriger ist als in der Mitte des Drahtes, so muß der an den Enden dieses Drahtes gemessene Widerstand kleiner sein als der bei idealer Temperaturverte-

lung (t = constans über die ganze Länge des Drahtes). Temperaturmessung siehe S. 20.

Diese Schwierigkeit läßt sich, wie im folgenden gezeigt wird, durch Ausführung von zwei Messungen an zwei verschieden langen Drähten gleichen Durchmessers und gleicher Temperatur (bezogen auf die Mitte des Drahtes) umgehen.

Es sei:

R = Widerstand in Ohm pro m bei t = constans über die ganze Länge des Drahtes (Idealfall) Abb. 5.

r = Widerstand in Ohm des Versuchsdrahtes mit der Länge l in m gemessen bei wirklicher Temperaturverteilung nach Abb. 6.

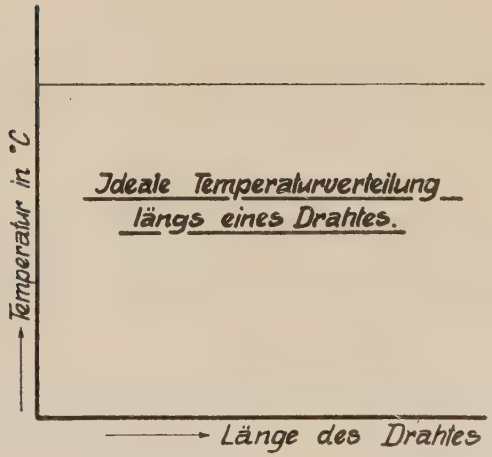


Abb. 5

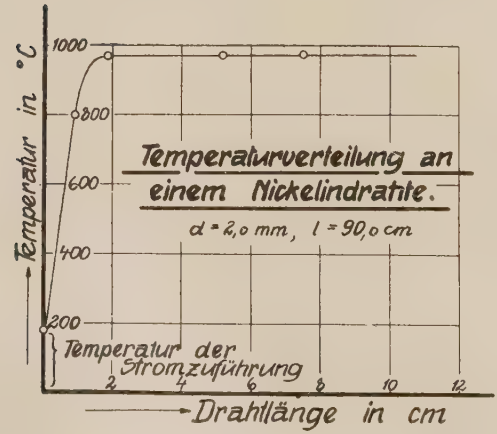


Abb. 6

l = Länge des Drahtes in m.
l. R-r = x durch Abkühlung beider Drahtenden hervorgerufene Widerstandserniedrigung in Ohm. Siehe Abb. 7.

Auf Abb. 7 sind die Verhältnisse für einen Draht graphisch dargelegt. Bei idealer Temperaturverteilung nach Abb. 5 ist der Widerstand eines Drahtes mit der Länge l = R · l (A in Abb. 7). In Wirklichkeit steigt die Temperatur und damit der Widerstand von der Einspannungsstelle aus langsam an (B in Abb. 7) bis in hinreichender Entfernung von der Einspannung die Widerstandszunahme

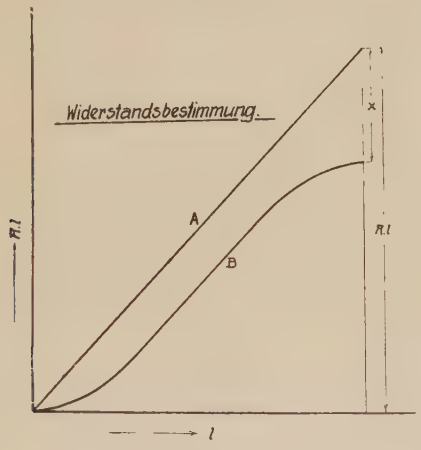


Abb. 7

pro Längeneinheit gleich der, des in Abb. 7 als A skizzierten Idealfalles ist. Die wirkliche Widerstandsverteilung längs des Drahtes wird also nach B erfolgen. r ist der tatsächlich meßbare Widerstand des Drahtes und $R \cdot l - r = x$ ist die Differenz zwischen dem Widerstand bei idealer und wirklicher Temperaturverteilung, also die, durch die Abkühlung der beiden Drahtenden durch die Einspannung hervorgerufene Widerstandserniedrigung.

Um R (Widerstand pro m bei t = constans über die ganze Länge des Drahtes) zu bestimmen, führen wir zwei Widerstandsmessungen aus, und zwar messen wir r_1 für einen Draht mit der Länge l_1 und r_2 für einen zweiten Draht mit der Länge l_2 (gleicher Durchmesser und gleiche Temperatur bezogen auf die Mitte des Drahtes vorausgesetzt. Abb. 8.)

Da in beiden Fällen dieselbe Art der Einspannung gewählt wird, werden die Temperaturverhältnisse am Ende beider Drähte gleich, also $x_1 = x_2 = x$.

Aus der Abb. 8 geht hervor, daß

$$r_2 - r_1 = (R \cdot l_2 - x) - (R \cdot l_1 - x)$$

ist. Also ist

$$R = \frac{r_2 - r_1}{l_2 - l_1}$$

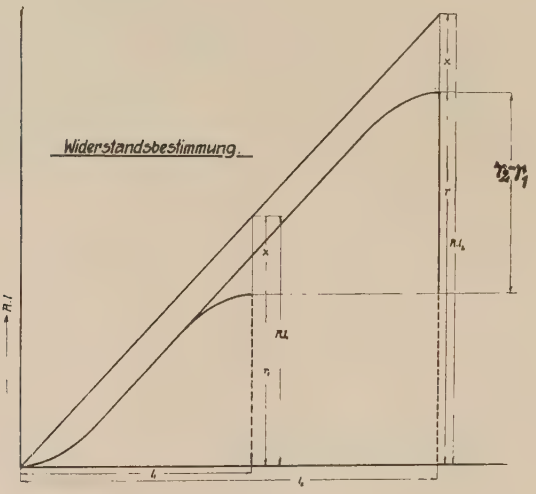


Abb. 8

Durch zwei Messungen bei $l = l_1$ und $l = l_2$ ist es also möglich, für jedes Material R zu bestimmen. Damit die Messungen genau werden, ist es erforderlich, daß die Differenz $l_2 - l_1$ groß ist.

Bei den Versuchen war $l_1 \sim 1$ m

$l_2 \sim 2$ m

Auf den Abb. 32, 33, 34 sind die Ergebnisse der Widerstandsmessung zusammengetragen, und zwar wird dort für jedes Material der spezifische Widerstand in Abhängigkeit von der Temperatur bis in die Nähe des Schmelzpunktes angegeben.

Der Widerstand eines Drahtes ist:

$$R = \frac{\varrho \cdot l}{q}$$

Der spezifische Widerstand ϱ ist definiert bei $l = 1$ m und $q = 1$ mm². Bis zu Temperaturen um 400° C ist ein Rechnen mit der vorgenannten Gleichung in erster Annäherung möglich (Fehler ca. 1 % bei 400 ° C), ohne daß die Änderungen der Dimensionen von l und q infolge der Wärmeausdehnung berücksichtigt werden brauchen.

Geht man aber erheblich über diese Temperaturen hinaus (die Versuche dieser Arbeit wurden bis gegen 1100° C

durchgeführt), so werden die Änderungen von l und q infolge der Ausdehnung so groß, daß sie bei Berechnung des Widerstandes R berücksichtigt werden müssen. Für diese Berücksichtigung sind folgende zwei Möglichkeiten vorhanden:

1. Der spezifische Widerstand ϱ wird, der Definition entsprechend, pro m und mm² für alle Versuchstemperaturen unter Berücksichtigung der Wärmeausdehnung bestimmt.

Die Berechnung von R gestaltet sich auf diesem Wege umständlich, weil der Ausdehnungskoeffizient β mit beachtet werden muß. Dieser wurde für alle in dieser Arbeit untersuchten Metalle bestimmt.

$$R = \frac{\varrho \cdot l \cdot (1 + \beta \cdot t)}{q \cdot (1 + \beta \cdot t)^2}$$

Diese Auffassung des spezifischen Widerstandes β ist nur durchführbar bis gegen 400—500° C. In diesem Temperaturbereich beginnen die Wirkungen der Oxydation den Durchmesser des Drahtes merklich zu vergrößern. Diese Vergrößerung, die völlig unberechenbar ist, erreicht leicht die Größenordnung der Durchmesserausdehnung und beträgt, besonders bei höheren Temperaturen, oft ein Vielfaches davon, wie folgendes Beispiel zeigen soll:

Ein Eisendraht von 1,000 mm Stärke dehnt sich bei einer Erwärmung auf 800° C auf 1,012 mm aus, während sich sein Durchmesser bereits nach fünf Minuten langer Glühzeit bei dieser Temperatur auf 1,035 mm (gemessen im kalten Zustande) vergrößert hatte. Dazu kommt noch, daß durch die Oxydation der leitende Querschnitt des Drahtes verkleinert und dadurch sein Widerstand vergrößert wird (S. 81).

2. Die Änderungen von l und q werden gemeinsam mit den Widerstandsänderungen infolge der Temperaturerhöhung in dem Koeffizienten ϱ zusammengefaßt.

Nach dieser Feststellung stellt ϱ den, zwischen zwei festen Potentialklemmen „beobachteten" Widerstand dar. Die Berechnung von R erfolgt nun auf einfache Weise nach der Gleichung

$$R = \frac{\varrho \cdot l}{q}$$

da in ϱ bereits der Einfluß der Ausdehnung mit berücksichtigt ist.

Es erhebt sich nun die Frage, welche von den erwähn-

ten beiden Auffassungen für diese Arbeit von größerem Vorteile ist.

Da die strenge Definition von ϱ nach 1. wegen den Wirkungen der Oxydation nur bis gegen 400—500° C genau durchführbar ist und die Versuche dieser Arbeit bis 1100° C vorgenommen werden, scheidet diese Auffassung aus, weil sie in dem ganzen Temperaturbereich nicht verwirklicht werden könnte.

Deshalb wurde die Auffassung des spezifischen Widerstandes nach 2. den Versuchen dieser Arbeit zugrunde gelegt. Sie bietet den Vorteil, daß die Berechnung von R bei allen Temperaturen nach der Formel

$$R = \frac{\varrho \cdot l}{q}$$

vorgenommen werden kann und der Ausdehnungskoeffizient β nicht gesondert berücksichtigt werden braucht. Da in der Praxis weitaus am häufigsten verlangt wird, den Widerstand R eines Drahtes bei der Temperatur t zu bestimmen und dabei die Kenntnis der Längenänderung infolge der Wärmeausdehnung von untergeordnetem Interesse ist, so ist die Auffassung von ϱ nach 2. entschieden die zweckmäßigere. Es muß jedoch darauf hingewiesen werden, daß die wirkliche Länge des Widerstandes R bei der Temperatur t dann nicht l (Länge bei Zimmertemperatur), sondern $l\,(1+\beta \cdot t)$ ist.

Alle Versuche wurden bei Zimmertemperatur vorgenommen, um den praktisch vorkommenden Verhältnissen Rechnung zu tragen.

6. Temperaturmessung.

Die Temperaturmessung wurde auf zwei Arten durchgeführt, und zwar mittels:

a) Thermoelement,
b) Pyrometer.

a) Thermoelement.

Um an der Berührungsstelle des Thermoelementes dem zu messenden Drahte keine, oder möglichst wenig Wärme zu entziehen, kamen nur Thermoelemente aus feinstem Drahte in Frage. Zu den Versuchen wurden drei Thermoelemente verwendet und zwar ein Platin-Platinrhodium-Element 0,03 mm stark (geliefert von W. C. Heraeus, Hanau a. M.) und ein Kupfer-Konstantan-Element 0,04 mm stark. Für Temperaturen unter 600° C wurde außer dem Kupfer-Konstantan-Element ein Silber-Konstantan-Element 0,04 mm stark verwendet, weil diese Thermo-

elemente bei niedrigen Temperaturen eine wesentlich größere Thermokraft besitzen als das Platin-Platinrhodium-Element.

Die Eichung der Thermoelemente wurde bis 250° C in einem Paraffinbade mit einem geeichten, von Grad zu Grad geteilten Quecksilber-Thermometer vorgenommen. Über 250° C wurde die Eichung im Heraeus-Ofen mit einem von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt geeichten Platin-Platinrhodium-Element von 0,6 mm Stärke ausgeführt. Die Thermokraft dieses Thermoelementes wurde mit einem Millivoltmeter von Hartmann & Braun gemessen. Das Instrument hatte je einen Meßbereich von $0 \div 17$ und $0 \div 52$ Millivolt. Der Widerstand desselben betrug bei dem Meßbereich bis 17 Millivolt = 1247 Ohm.

Da Thermoelemente mit einem Durchmesser von 0,03 mm einen Widerstand haben, der in der Größenordnung von mehreren hundert Ohm liegt, konnte die Thermokraft nicht auf die übliche Art mit einem Millivoltmeter gemessen werden. Es wurde daher die auf Abb. 9 dargestellte Kompensationsschaltung benutzt. Das Thermoelement mit der elektromotorischen Kraft e liegt mit einem empfindlichen Zeiger-Galvanometer V von Siemens & Halske (1 Grad = 3.10^{-7} Ohm, r = 85 Ohm) an dem Normalwiderstand R. Ebenfalls parallel zu diesem Widerstande liegt ein Weston-Milliamperemeter mit einem Meßbereich bis 30 Milliamp., ein Akkumulator mit der Spannung E = 2 Volt und Regulierwiderstände.

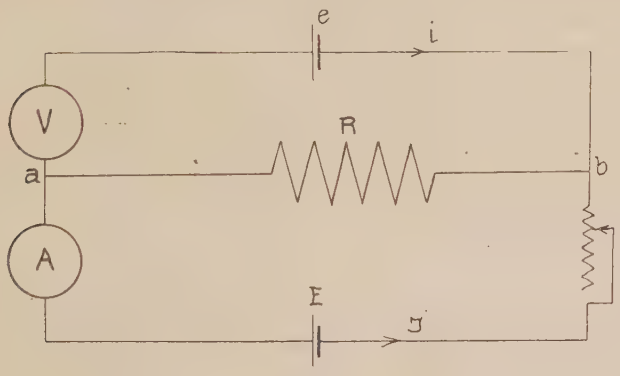


Abb. 9

Bei der Temperaturmessung wurden die Regulierwiderstände so eingestellt, daß das Galvanometer V stromlos wurde. Dann war

$$e = I \cdot R$$

I ist also ein Maß für die Thermokraft e. Der Normal-

widerstand R hatte bei Benutzung des Platin-Platinrhodium-Elementes einen Widerstand von R = 0,5 Ohm, bei Benutzung des Kupfer-Konstantan-Elementes 1,0 Ohm und bei Benutzung des Silber-Konstantan-Elementes 1,5 Ohm. Der Einfluß der Zuleitungen zum Normalwiderstand R wurde durch Miteichen der Zuleitungen ausgeschaltet.

Wie im folgenden gezeigt wird, beträgt die Meßgenauigkeit für das Platin-Platinrhodium-Element 1° C, für das Kupfer - Konstantan - Element 0,4° C und für das Silber-Konstantan-Element 0,3° C.

Berechnungsbeispiel für das Platin-Platinrhodium-Element: Das verwendete Präzisions - Weston - Milliamperemeter hatte einen Meßbereich von 30 Milliamp. bei 150 Teilstrichen. $^1/_{10}$ Teilstrich und damit $^1/_{50}$ Milliamp. waren noch ablesbar. Der Parallelwiderstand R betrug 0,5 Ohm und die Thermokraft e demnach $0{,}5 \cdot 0{,}00002 = 0{,}00001$ Volt ($^1/_{100}$ Millivolt). Bei einer Temperatursteigerung von 10° C ändert sich die Thermokraft des Platin-Platinrhodium-Elementes um den mittleren Betrag von $^1/_{10}$ Millivolt. Da wir $^1/_{100}$ Millivolt noch messen können, so beträgt die Meßgenauigkeit der benutzten Meßanordnung bei Verwendung des Platin-Platinrhodium-Elementes $\sim$ 1° C.

Von allen Thermoelementen wurden sowohl Erwärmungs- als auch Abkühlungskurven aufgenommen. Es folgen nun die Eichtabellen für die verwendeten Thermoelemente:

a) Platin-Platinrhodium-Element. 0,03 mm. Abb. 10.

Eich-Thermoelement

e Millivolt	t ° Celsius	I Milliamp.
1,77	245	3,86
2,44	323	5,20
3,08	395	6,46
3,67	457	7,72
4,47	538	9,48
5,21	611	11,28
6,23	707	13,46
7,16	794	15,58
8,50	915	18,20
9,60	1012	20,34
10,10	1055	21,24
10,88	1123	22,60
11,50	1177	23,34

Kompensationswiderstand R = 0,5 Ohm.

Die Eichung wurde bis t = 1200° C durchgeführt. Für höhere Temperaturen war der Heraeus-Ofen nicht brauchbar.

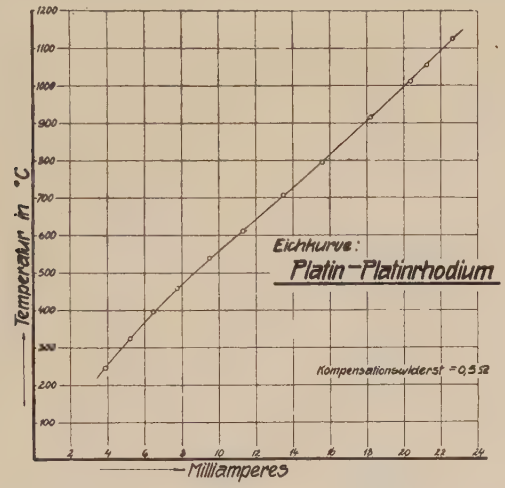


Abb. 10

b) Silber-Konstantan-Element. 0,04 mm. Abb. 11 a, b.

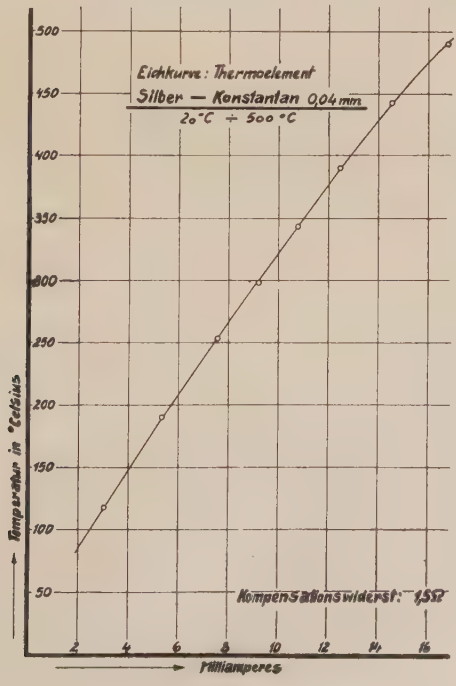


Abb. 11a

t ° Celsius	I Milliamp.
118	3,065
190	5,35
253	7,53
298	9,20
343	10,81
390	12,47
492	14,52
490	16,80
543	19,45
587	21,72
603	22,60
629	24,05
654	25,4
681	26,8
706	28,2
731	29,5

Kompensationswiderstand R = 1,5 Ohm.

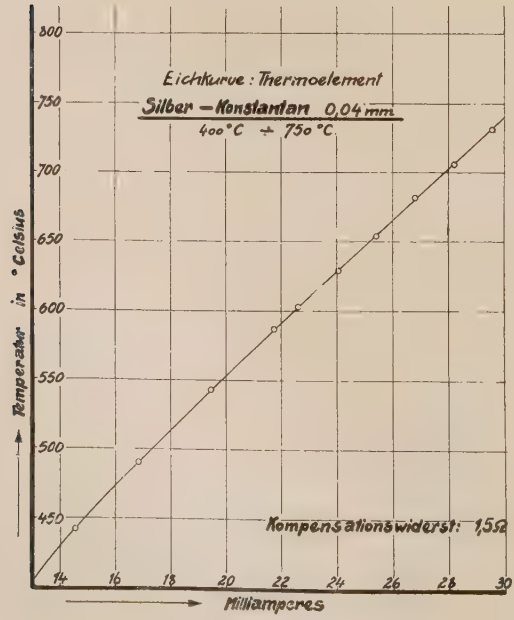


Abb. 11b

c) Kupfer-Konstantan-Element. 0,04 mm. Abb. 12.

t ° Celsius	I Milliamp.
80	2,6
92	3,0
110	3,7
130	4,7
148	5,0
172	6,8
200	8,2
224	9,4
250	10,7
285	12,9
308	14,4
342	16,5
372	18,4
407	20,6
445	23,0
490	25,8

Kompensationswiderstand R = 1,0 Ohm.

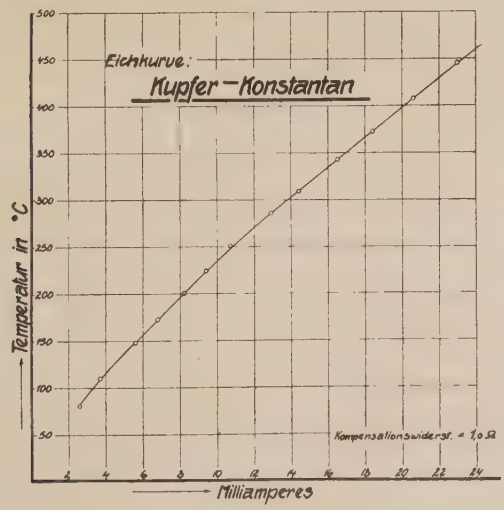


Abb. 12

Die Befestigung des Thermoelementes an dem Versuchsdrahte wurde, wie in Abb. 13 skizziert, vorgenommen. Beide Drähte des Thermoelementes wurden nicht

zusammengelötet, sondern kreuzweise über den Versuchsdraht geschlungen, und zwar so, daß der Draht a den Draht b auf dem Versuchsdrahte mittels eines kleinen Gewichtes festhält. Das wurde dadurch erreicht, daß an dem

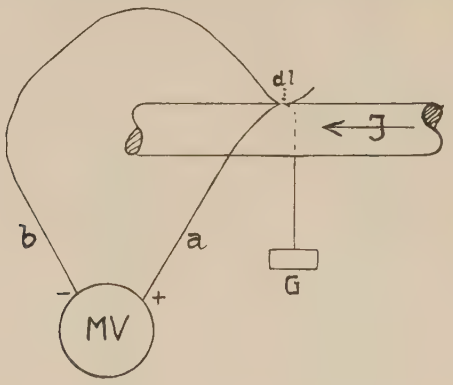


Abb. 13

einen Ende des Drahtes a ein kleiner Metallstab hängend befestigt wurde, so daß das Thermoelement mit einem immer gleichbleibenden Druck auf dem Versuchsdrahte festgehalten wurde. Von mehreren untersuchten Befestigungsmöglichkeiten gab diese Methode die besten Ergebnisse und war, wenn man den außerordentlich dünnen Draht berücksichtigt, verhältnismäßig einfach herzustellen.

Da bei dieser Anordnung die Lötstelle des Thermoelementes nicht punktförmig ist, sondern eine, wenn auch sehr kleine Ausdehnung hat, fälscht der Spannungsabfall längs dieser kleinen Strecke, bei Heizung des Drahtes mit Gleichstrom, das Ergebnis der Temperaturmessung. Diese kleine Spannung wirkt entweder in Richtung der Thermokraft oder entgegengesetzt. Wollte man die Thermokraft bei Heizung des Drahtes mit Gleichstrom messen, so müßte man bei jeder Temperaturmessung zweimal die Thermokraft messen und bei der zweiten Messung den Belastungsstrom umkehren.

Es sei:

e = die zu bestimmende Thermokraft und
$a = I \cdot dl$ der Spannungsabfall.

Im Falle 1 mißt man: $e + a = z_1$
Im Falle 2 mißt man: $e - a = z_2$

$$2e = z_1 + z_2$$

$$e = \frac{z_1 + z_2}{2}$$

Da es leicht vorkommen kann, daß der Spannungsabfall a von der Größenordnung der Thermokraft ist, gibt diese Methode keine zuverlässigen Werte.

Die Heizung des Drahtes wurde deshalb mit Wechselstrom vorgenommen. Um das empfindliche Zeiger-Galvanometer V (Abb. 9) nicht durch eine zu große Wechselspannung zu schädigen, wurde eine Drossel von 60 Henry hinter das Thermoelement geschaltet. Vergleichende Messungen der Thermokraft bei Heizung des Versuchsdrahtes 1. mit Gleichstrom und 2. mit Wechselstrom ergaben gute Übereinstimmung.

Vor Beginn der Temperaturmessung wurden die Thermoelemente auf ihre Homogenität geprüft. Das Platin-Platinrhodium-Element wurde sorgfältig ausgeglüht. Eine Messung der Thermokraft bei konstanter Temperatur an verschiedenen Berührungsstellen ergab keine meßbare Abweichung. Das Silber-Konstantan-, wie das Kupfer-Konstantan-Element zeigten Abweichungen, die nur Bruchteile eines Grades Celsius betrugen und zweifellos von Verunreinigungen herrührten, die beim Ziehen von derartig dünnen Drähten nicht zu vermeiden sind. Nach dem Vorschlage von Walter P. White. Phys. Zeitschr. 1907, S. 337, wurde der Konstantandraht gehärtet, um auch diese kleinen Inhomogenitäten zum Verschwinden zu bringen. Der Draht wurde mehrere Male über die rechtwinklige Kante eines Holzstückes hin- und hergezogen und dann durch 15 Minuten auf 100° C erwärmt, um den Draht zu „altern". Durch dieses Verfahren hatte der Konstantandraht eine vollkommen gleichmäßige Härte über seine ganze Länge erhalten, so daß Schwankungen der Thermokraft nicht mehr meßbar waren.

Die durch die dünnen Drähte (0,03 mm) des Thermoelementes verursachte Abkühlung war so gering, daß man sie mit dem optischen Pyrometer kaum nachweisen konnte. Der Betrag der Temperaturerniedrigung liegt demnach innerhalb der Meßgrenze des Pyrometers.

b) Die Messung mit dem Pyrometer.

Zur Temperaturmessung über 700° C wurde, falls die maximale Stromstärke des Wechselstromgenerators (I = 150 Amp.) nicht mehr ausreichte, um besonders bei dickeren Drähten höhere Temperaturen zu erzielen, das A.E.G.-Pyrometer verwendet, da in solchen Fällen die Erwärmung des Versuchsdrahtes mit Gleichstrom vorgenommen werden mußte und dann das Thermoelement aus den im vorigen Abschnitt angeführten Ursachen nicht mehr verwendet werden konnte.

Das A.E.G.-Pyrometer besteht aus einem innen geschwärzten Rohr, an dessen, dem leuchtenden Gegenstande zugewendeten Öffnung zwei parallele, leuchtende Fäden einer Niederspannungslampe angebracht sind, die ein genaues Vergleichen ihrer Helligkeit mit der des Versuchsdrahtes gestatten. Die Helligkeit des Pyrometers konnte durch einen, in dem erwähnten Rohr untergebrachten Schiebe-Widerstand abgeglichen werden. Die Stellung des Schiebers dieses Widerstandes war in Temperaturen geeicht. Das Pyrometer wurde an eine Akkumulatorenbatterie von 220 Volt angeschlossen, um ein Schwanken der Helligkeit zu vermeiden, wie es beim Anschluß an das Netz durch Netzschwankungen verursacht wird. Das Instrument wurde mit dem Wannerschen Pyrometer geeicht und festgestellt, daß die Angaben des A.E.G.-Pyrometers in dem hier verwendeten Bereich von 650° C bis 1200° C bis auf 10° C mit dem Eichpyrometer übereinstimmten. Das Wannersche Pyrometer war von der Physikalisch-Technischen Reichsanstalt geeicht.

7. Strommessung.

Bei Heizung des Versuchsdrahtes mit Gleichstrom wurde die Strommessung mittels eines Präzisions-Weston-Amperemeters durchgeführt, dessen Meßbereich sich mittels eines Dreh-Shunts von 0,3 bis 300 Amp. verändern ließ. Bei Heizung des Versuchsdrahtes mit Wechselstrom wurden zur Strommessung zwei Präzisions-Amperemeter für Gleich- und Wechselstrom von Siemens & Halske verwendet. Sie hatten die Meßbereiche:

0 — 50 Amp.
0 — 100 „
0 — 200 „

Alle Instrumente waren vor Beginn der Messungen geeicht worden. Als Stromquelle für die, oft sehr großen Ströme standen zur Verfügung:

1 Gleichstrom-Hochstrom-Generator E = 25 Volt,
I = 400 Amp.,
1 Wechselstrom-Generator E = 220 Volt,
I = 150 Amp.,
f = 50 Perioden.

II. Die Temperaturverteilung am frei ausgespannten Versuchsdrahte.

Rechnerisch wurde das Problem von Fritz Emde in „Elektrotechnik und Maschinenbau" 1907, 15. Jahrg., S. 455, behandelt.

Als für die Rechnung vereinfachende Annahmen setzt Emde fest:

1. Die Klemmen, an denen der Draht endet, haben so große Massen und damit so große Wärmekapazität, daß sie sich nicht merklich erwärmen.
2. Der Temperaturkoeffizient des untersuchten Materials ist konstant.
3. Die Temperatur der Luft, die den Versuchsdraht umgibt, ist konstant.

Unter diesen Voraussetzungen errechnet Emde die Beharrungstemperatur t im stationären Zustande im Abstande y von der Drahtmitte zu:

$$t = V\left(1 - \frac{g\,\mathfrak{Cof}\,(m \cdot y)}{g\,\mathfrak{Cof}\,(m \cdot L) - K \cdot m \cdot \mathfrak{Sin}\,(m \cdot L)}\right) \quad (1)$$

wobei

$$m^2 = \frac{h \cdot s - \alpha \cdot \varrho_0 \cdot S^2}{p} = \frac{s}{B} - \left(\frac{S}{D}\right)^2$$

und

$$V = \frac{1 - \alpha \cdot U}{h \cdot s - \alpha \cdot \varrho_0 \cdot S^2} = \left(\frac{S}{m \cdot C}\right)^2 \text{ ist.}$$

Darin bedeutet:

g = Konstante des Wärmeüberganges zu den Klemmen in Watt/cm² · °C.
h = äußere Wärmeleitfähigkeit der Drahtoberfläche 10^{-3} Watt/cm² · °C.
p = Innere Wärmeleitfähigkeit des Drahtmaterials in Watt/cm · °C.
$s = \frac{\lambda}{q}$ = Umfang des Drahtquerschnittes. Drahtquerschnitt.
ϱ_0 = Spezifischer Widerstand.
α = Temperaturkoeffizient des Widerstandes nach Annahme 2.) = constans.
$S = \frac{I}{q}$ = Stromdichte in Amp./mm².
y = Entfernung von der Drahtmitte L.
L = halbe Länge des Drahtes.
U = Temperatur der Luft, die den Draht umgibt, in °C.

Um eine zahlenmäßige Auswertung obiger Formel zu ermöglichen, hat Emde seiner Arbeit eine Tabelle beigegeben, aus welcher die Größen B, C, D, für die Metalle Aluminium, Blei, Kupfer, Silber, Zink und Zinn zu entnehmen sind.

Da in Gleichung (1) nur der Cos (m · y) veränderlich ist, wird die Beharrungstemperatur durch eine, bezogen auf die Abszissenachse, umgekehrte Kettenlinie dargestellt.

Die Voraussetzung 1. einer sehr großen Wärmekapazität der Stromklemmen ist zwar praktisch leicht zu erreichen, wurde aber aus Gründen einer möglichst konstanten Temperatur über den ganzen Draht bei diesen Versuchen nicht angestrebt, sondern es wurde im Gegenteil danach getrachtet, Klemmen mit möglichst kleiner Wärmekapazität zu verwenden.

Eine weitere Ursache, die die Temperaturverteilung an Drähten unübersichtlich macht, sind kleine Verunreinigungen des Drahtmaterials und Unregelmäßigkeiten der Oxydation, wodurch, besonders nach längerem Glühen, wie in dieser Richtung angestellte Versuche zeigten (siehe Abschnitt VIII, S. 81), bei ungünstigen Verhältnissen Temperaturunterschiede bis 200° C bei I = constans längs des Versuchsdrahtes auftreten können.

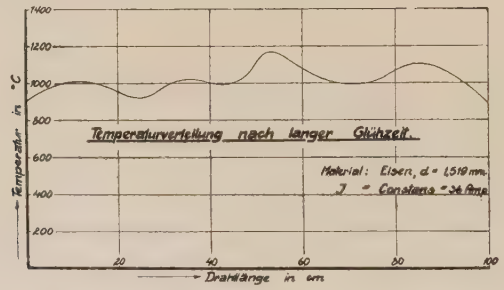


Abb. 14

Abb. 14 zeigt die Temperaturverteilung an einem Eisendraht (d = 1,519 mm), der 40 Minuten mit dem Strom I = constans = 36 Amp. belastet wurde. Da der Widerstand des Drahtes während dieser Zeit um 49,4 % gestiegen war, waren die zugeführten Watt/cm² um den gleichen Prozentsatz gestiegen, da I konstant gehalten wurde. Diese zusätzlichen Watt/cm² W hatten sich aber nicht gleichmäßig über die Drahtoberfläche verteilt, sondern es bildeten sich infolge der verschieden starken Oxydation und infolge kleiner Verunreinigungen des Drahtmaterials Temperatursenken und Temperaturgipfel. Diese Erscheinung war in gleicher Deutlichkeit bei Kupfer und Nickelin und in wesentlich geringerem Maße bei Nickel zu beobachten. Nähere Angaben über die Temperaturverteilung an Drähten bei längeren Glühzeiten finden sich S. 81.

Um festzustellen, bei welcher Drahtlänge der Einfluß der Strom- und Spannungsklemmen auf die Temperatur in

der Mitte des Drahtes aufhört, wurde eine Reihe von Versuchen mit allen in dieser Arbeit untersuchten Metalldrähten gemacht. In Abb. 15 ist für einen Kupferdraht

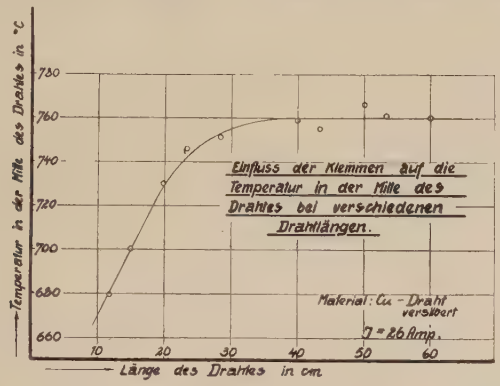


Abb. 15

(versilbert) von 0,6 mm Stärke die Temperatur in der Mitte des Versuchsdrahtes bei I = constans = 26 Amp. in Abhängigkeit von verschiedenen Drahtlängen aufgetragen. Entsprechend dem guten Wärmeleitvermögen von Silber und Kupfer liegen die Verhältnisse für diese beiden Metalle besonders ungünstig. Es zeigt sich, daß bei Drähten, die kürzer als 25 cm sind, der Einfluß der Klemmen deutlich hervortritt. Deshalb wurde bei allen Versuchen die Drahtlänge nicht kleiner als 1 m, meistens aber bis 2 m gewählt.

III. Die chemische Zusammensetzung des Versuchsmaterials.

1. Aluminium.

Das gesamte Aluminiumdrahtmaterial wurde von den Metallwerken Carl Berg, A.-G., Eveking in Westfalen, liebenswürdigerweise für die vorliegende Untersuchung zur Verfügung gestellt. Die chemische Durchschnittsanalyse der Drähte beträgt nach Angabe der Lieferfirma:

Al	ca. 99,6 %
Fe	0,18 — 0,21 %
Si	0,16 — 0,19 %

2. Eisen.

Die Eisendrähte wurden für die Zwecke dieser Arbeit von den „Vereinigten Oberschlesischen Hüttenwerken" in Gleiwitz freundlichst zur Verfügung gestellt. Nach Angabe der Oberschlesischen Hüttenwerke ist der Draht der normal gezogene, harte Eisendraht. Seine chemische Durchschnittsanalyse beträgt:

Fe	99,21 %
Mn	0,45 %
P	0,04 %
S	0,04 %
Cu	0,16 %

3. Kupfer.

Die Kupferdrähte wurden von den „Deutschen Kabelwerken A.-G.", Berlin, bezogen. Die Herstellerin gab keine genaue chemische Analyse der Kupferdrähte an, doch dürfte die Fabriksbezeichnung des Drahtmaterials „Elektrolytkupferdraht, blank, weich", zur genauen Feststellung desselben ausreichen.

4. Nickelin.

Die Nickelindrähte wurden von der „Sächsischen Metallwarenfabrik August Wellner Söhne A.-G.", Aue in Sachsen, liebenswürdigerweise für diese Arbeit bereitgestellt. Nach Angaben der Firma August Wellner Söhne A.-G. beträgt die Durchschnittsanalyse des Nickelindrahtes:

Cu	ca. 55 %
Ni	ca. 30 %
Zn	ca. 15 %

5. Reinnickel.

Der Reinnickeldraht wurde von den „Metallwerken in Bärenstein" in Westfalen unter Angabe folgender Durchschnittsanalyse freundlichst zur Verfügung gestellt:

Ni	99,00 — 99,10 %
Cu	0,17 — 0,33 %
Fe	0,40 — 0,45 %
Mn	0,20 — 0,30 %
Mg	0,05 — 0,07 %
Pb	0,02 — 0,04 %

6. Silber.

Die Silberdrähte wurden von der Firma Julius Sckeyde, Breslau, bezogen. Die Drähte sind 1000 — fein und werden im gewöhnlichen Handelsverkehr zum Erneuern durchgebrannter Sicherungen verkauft.

7. Zinn.

Die Zinndrähte wurden von der „Blei-Industrie-A.-G. Jung & Lindig", Freiberg in Sachsen, in dankenswerter Weise bereitgestellt. Die Drähte werden nach Angaben der Herstellerin aus Original-Hüttenzinn, dessen Reingehalt ca. 99,5 % beträgt, gezogen. Genauere Angaben über die chemische Zusammensetzung waren nicht zu erhalten.

IV. Ergebnisse der Messung.

1. Die Erwärmungskurven.

Die Zeitdauer zwischen je zwei Ablesungen schwankte mit der Stärke des Drahtes von einer Minute bei dünnen Drähten bis zu drei Minuten bei dicken Drähten. Der Einfluß der Oxydation ist im allgemeinen nur bei Temperaturen über 900° C so groß, daß die Zeit zwischen zwei Ablesungen genügt, um eine meßbare Änderung der Temperatur durch die wachsende Oxydation des Drahtes zu verursachen, und zwar hat die Temperatur die Tendenz, bei langen Glühzeiten und konstantem Strom zu sinken.

Um bei den Messungen über 900° C den Einfluß der Oxydation möglichst zu verringern, wurde für jede Messung ein neuer Versuchsdraht genommen.

Die Versuchswerte werden über 900° C für unsere Betrachtung dadurch stark entwertet, daß der Querschnitt und die Oberfläche des Drahtes durch die Oxydation in einem, im Vergleich mit der natürlichen Wärmeausdehnung ganz ungewöhnlichen Maße vergrößert werden. So stieg beispielsweise der kalt zu 1,398 mm gemessene Durchmesser eines Nickelindrahtes, der 30 Minuten auf 980° C erwärmt wurde, auf 1,561 mm (kalt gemessen) und der kalt zu 1,520 mm gemessene Durchmesser eines Eisendrahtes, der auf 1050° C erhitzt wurde, bereits nach 5 Minuten auf 1,562 mm (kalt gemessen) und nach 30 Minuten auf 2,176 mm (kalt gemessen). Da der Oxydationsvorgang durch mancherlei Zufälligkeiten, wie Abbröckeln des Oxydes usw., mitbestimmt wird, läßt sich eine etwa vorhandene Gesetzmäßigkeit nicht feststellen.

Wurde irgendeiner der untersuchten Metalldrähte in glühendem Zustande in ungefähr fünfzigfacher Vergrößerung auf der Mattscheibe des Vergrößerungsapparates beobachtet, so war deutlich zu sehen, daß die untere Hälfte des Drahtes weniger leuchtete als die obere. Diese Erscheinung wird durch die natürliche Konvektion verursacht. Die Größe dieses Temperaturunterschiedes betrug bei 700° C ungefähr 12° C.

Die Erwärmungskurven sind dargestellt auf:

Abb. 16, 17	für Aluminium,
Abb. 18, 19, 20	für Eisen,
Abb. 21, 22	für Kupfer,
Abb. 23, 24, 25	für Nickelin,
Abb. 26, 27	für Reinnickel,
Abb. 28, 29	für Silber,
Abb. 30, 31	für Zinn.

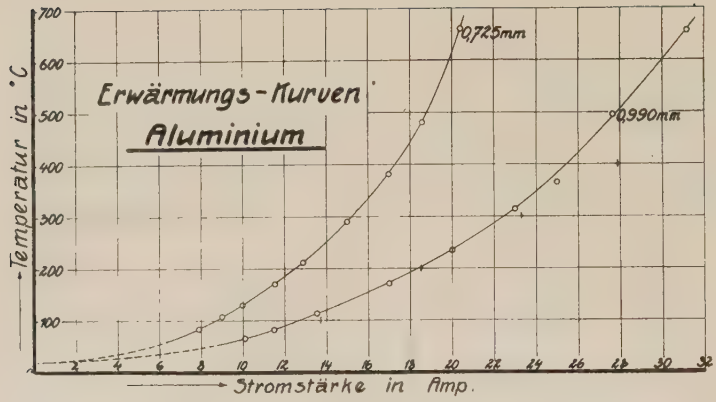

Erwärmungs-Kurven
Aluminium
0,725mm
0,990mm
Temperatur in °C
Stromstärke in Amp.

Abb. 16

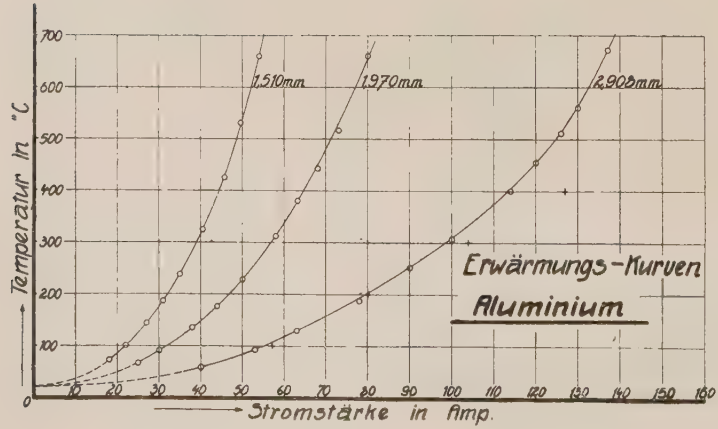

1,510mm
1,970mm
2,905mm
Erwärmungs-Kurven
Aluminium
Temperatur in °C
Stromstärke in Amp.

Abb. 17

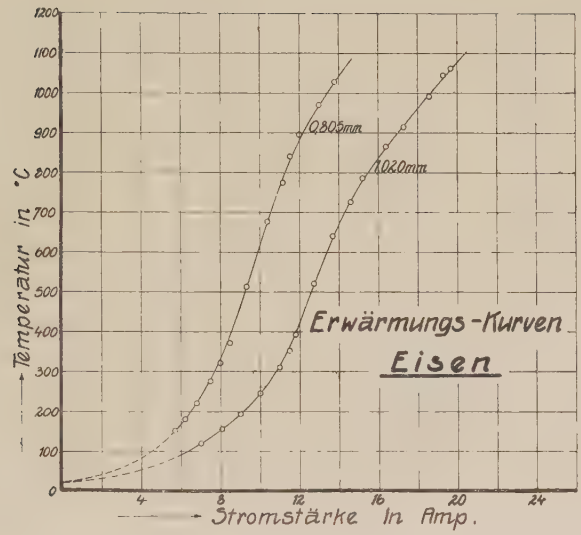

Temperatur in °C
Stromstärke in Amp.
0,805mm
1,020mm
Erwärmungs-Kurven
Eisen

Abb. 18

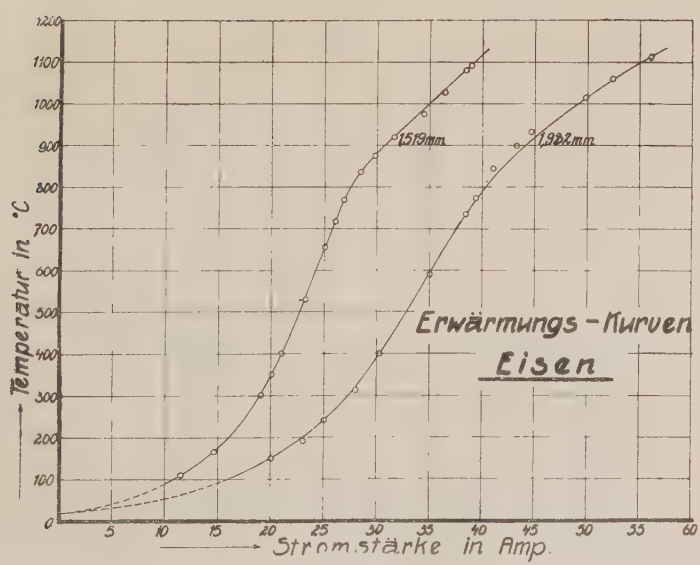

Temperatur in °C
Stromstärke in Amp.
1,519mm
1,922mm
Erwärmungs-Kurven
Eisen

Abb. 19

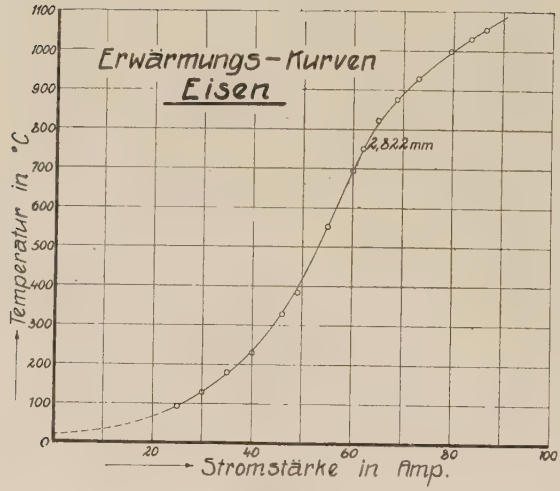

Erwärmungs-Kurven
Eisen
2,822mm
Temperatur in °C
Stromstärke in Amp.
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
1100
20
40
60
80
100

Abb. 20

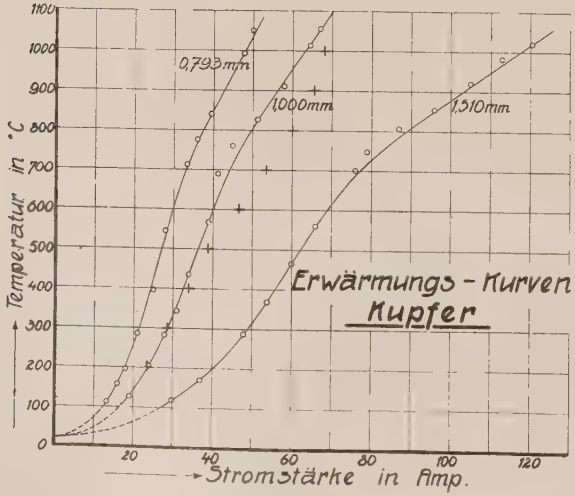

0,793mm
1,000mm
1,510mm
Erwärmungs-Kurven
Kupfer
Temperatur in °C
Stromstärke in Amp.
0
100
200
300
400
500
600
700
800
900
1000
1100
20
40
60
80
100
120

Abb. 21

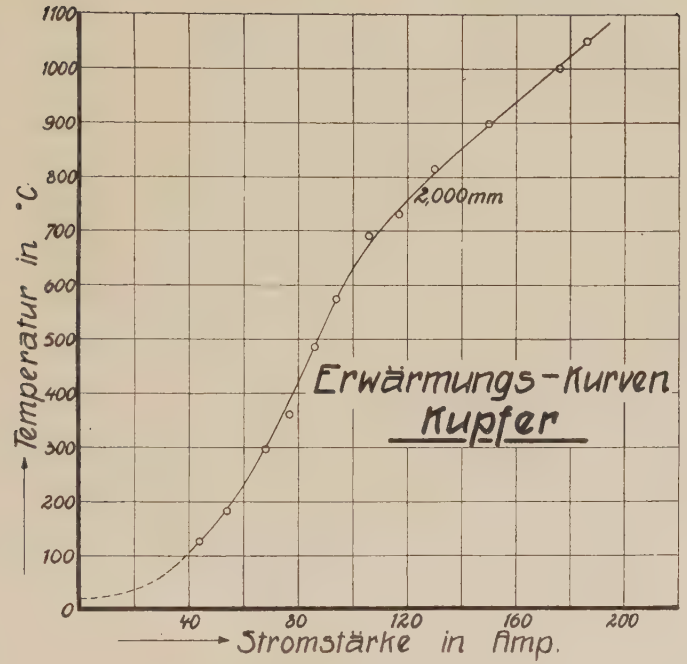

Temperatur in °C
1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
2,000mm
Erwärmungs-Kurven
Kupfer
40
80
120
160
200
Stromstärke in Amp.

Abb. 22

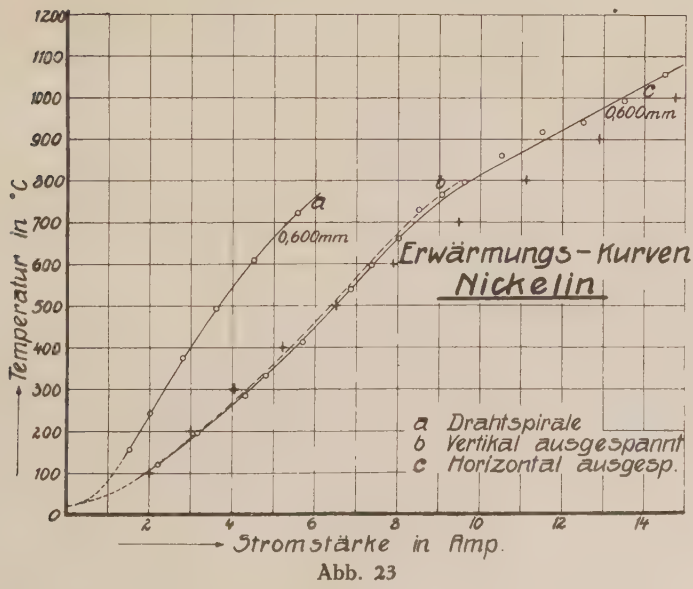

Temperatur in °C
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
a
0,600mm
b
c
0,600mm
Erwärmungs-Kurven
Nickelin
a Drahtspirale
b Vertikal ausgespannt
c Horizontal ausgesp.
2
4
6
8
10
12
14
Stromstärke in Amp.

Abb. 23

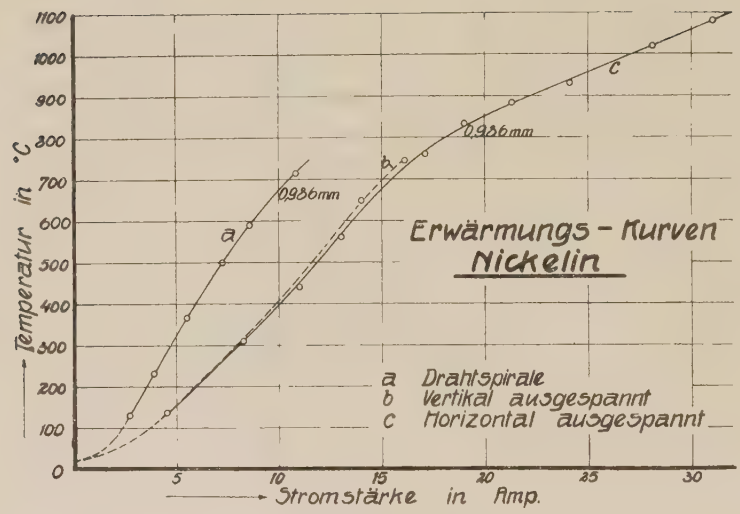

Temperatur in °C
1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
5
10
15
20
25
30
Stromstärke in Amp.
0,936mm
0,936mm
a
b
c
Erwärmungs - Kurven
Nickelin
a Drahtspirale
b Vertikal ausgespannt
c Horizontal ausgespannt

Abb. 24

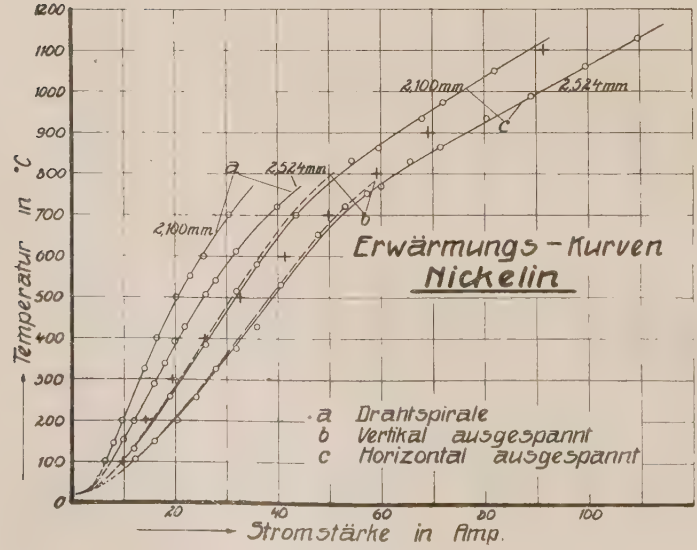

Temperatur in °C
1200
1100
1000
900
800
700
600
500
400
300
200
100
0
20
40
60
80
100
Stromstärke in Amp.
2,100mm
2,524mm
2,524mm
2,100mm
a
b
c
Erwärmungs - Kurven
Nickelin
a Drahtspirale
b Vertikal ausgespannt
c Horizontal ausgespannt

Abb. 25

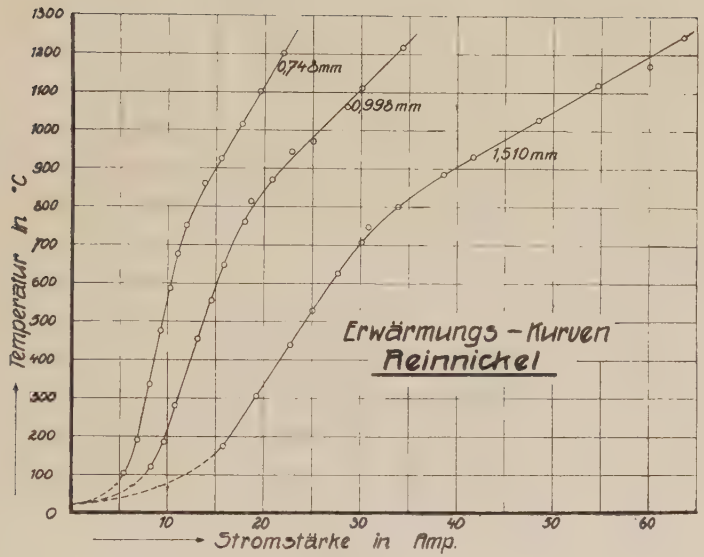

0,748mm
0,998mm
1,510mm
Erwärmungs – Kurven
Reinnickel
Temperatur in °C
Stromstärke in Amp.

Abb. 26

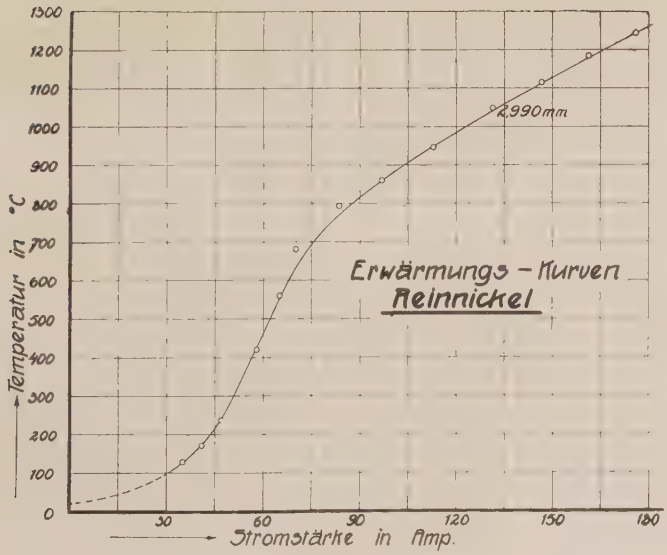

2,990mm
Erwärmungs – Kurven
Reinnickel
Temperatur in °C
Stromstärke in Amp.

Abb. 27

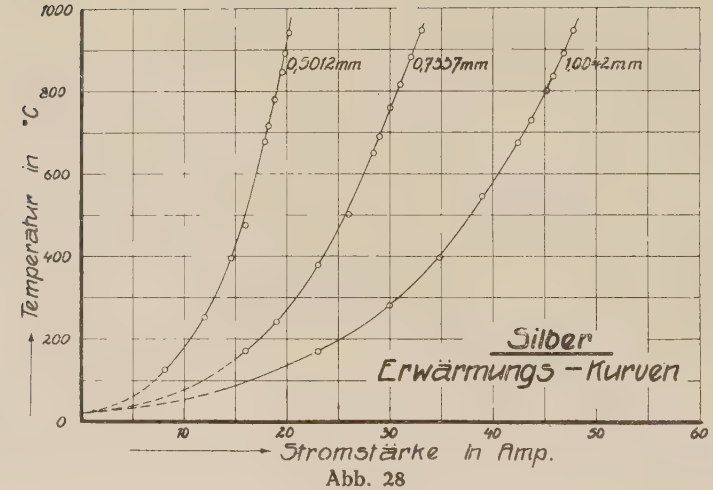

1000
800
600
400
200
0
Temperatur in °C
0,5012mm
0,7337mm
1,0042mm
Silber
Erwärmungs – Kurven
10
20
30
40
50
60
Stromstärke in Amp.

Abb. 28

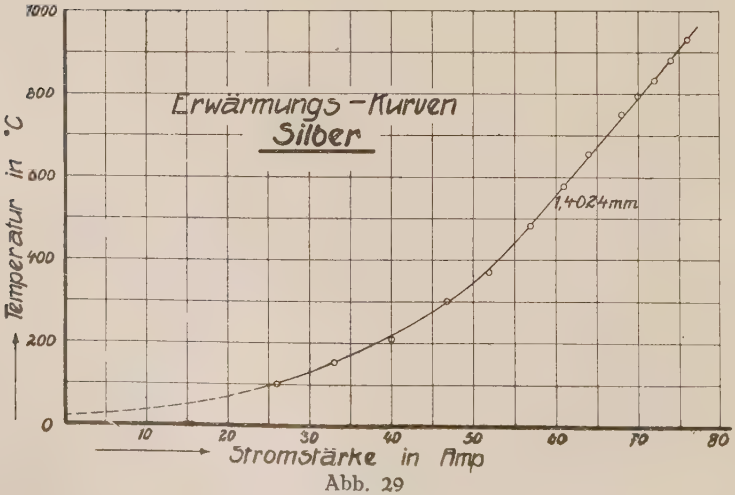

1000
800
600
400
200
0
Temperatur in °C
Erwärmungs – Kurven
Silber
1,4024mm
10
20
30
40
50
60
70
80
Stromstärke in Amp

Abb. 29

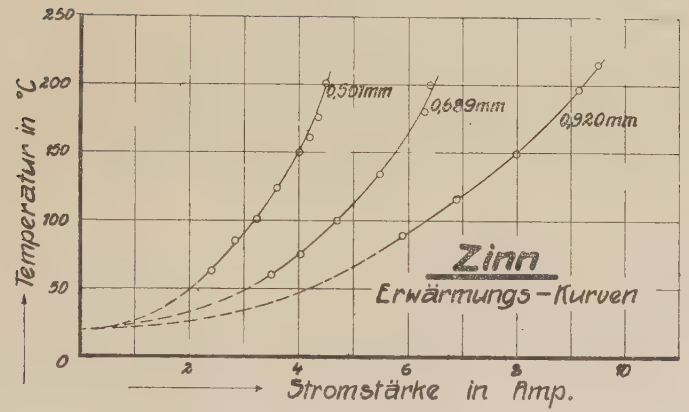

250
200
150
100
50
0
Temperatur in °C
0,501mm
0,689mm
0,920mm
Zinn
Erwärmungs-Kurven
2
4
6
8
10
Stromstärke in Amp.

Abb. 30

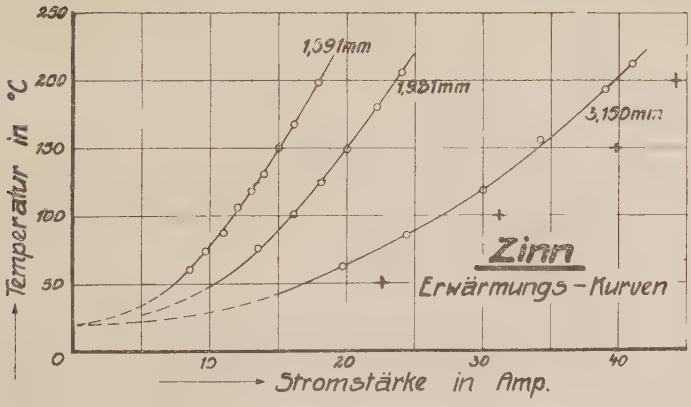

250
200
150
100
50
0
Temperatur in °C
1,391mm
1,981mm
3,150mm
Zinn
Erwärmungs-Kurven
10
20
30
40
Stromstärke in Amp.

Abb. 31

2. Ergebnisse der Mesung des Ausdehnungskoeffizienten.

(Text siehe S. 12.)

a) Aluminium. Abb. 1.

t °Celsius	$\triangle l$ in mm/m	β
178	4,263	0,0000270
332	8,442	0,0000271
498	13,289	0,0000277
580	17,035	0,0000304

b) Eisen. Abb. 1.

t °Celsius	$\triangle l$ in mm/m	β
372	3.263	0.00000928
454	5 809	0,00001355
563	7,877	0,00001448
805	12,049	0,00001535

c) Kupfer. Abb. 1.

t °Celsius	$\triangle l$ in mm/m	β
302	5.637	0,00001995
482	8,543	0,00001850
618	11,393	0,0000190
765	14,826	0,0000199

d) Nickelin. Abb. 2.

t °Celsius	$\triangle l$ in mm/m	β
306	8,394	0,0000293
577	16,568	0,0000298
810	24,609	0,0000313
844	27,613	0,0000335

e) Reinnickel. Abb. 1.

t °Celsius	$\triangle l$ in mm/m	β
342	5,356	0,00001660
527	8,139	0,00001542
695	11,195	0,00001658
929	15,136	0,00001665

f) Silber. Abb. 1.

t ° Celsius	Δl in mm/m	β
240	4,425	0,0000205
335	6,381	0,0000212
500	9,932	0,0000207
775	16,155	0,0000214

g) Zinn. Abb. 1.

t ° Celsius	Δl in mm/m	β
117	2,64	0,0000271
170	4,62	0,0000303

3. Ergebnisse der Widerstandsmessung.

Für jeden zu untersuchenden Draht wurde eine Kurve aufgenommen, welche den, durch den Draht fließenden Belastungsstrom I als Funktion der Beharrungstemperatur zeigt. Mittels dieser Erwärmungskurve ist es möglich zu jedem, durch einen Draht gleichen Durchmessers und Materials fließenden Strom die Temperatur dieses Drahtes im Beharrungszustande anzugeben. Alle untersuchten Drähte eines Durchmessers wurden immer vom gleichen Drahtring genommen. Jede Versuchsreihe wurde fünfmal gemacht und das arithmetische Mittel aus den einzelnen Messungen als Ergebnis genommen.

Die Versuchsdrähte waren horizontal ausgespannt.

Die Ergebnisse der Widerstandsmessung sind dargestellt auf den Abb. 32, 33, 34.

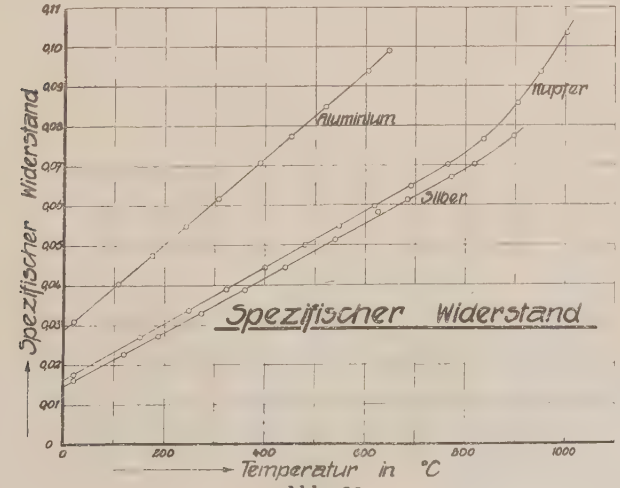


Abb. 32

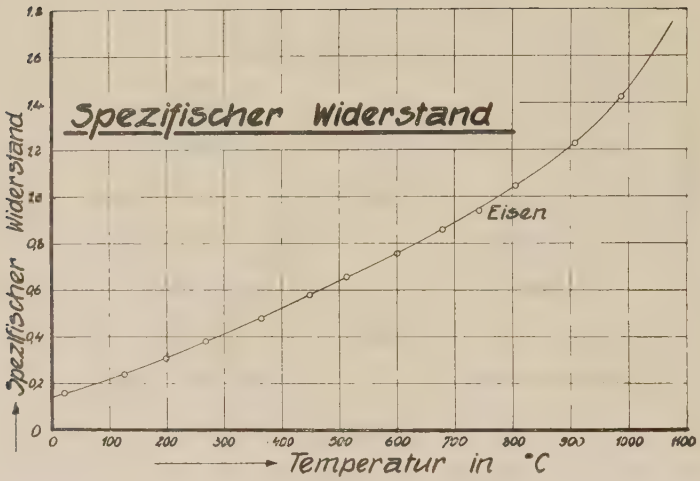


Abb. 33

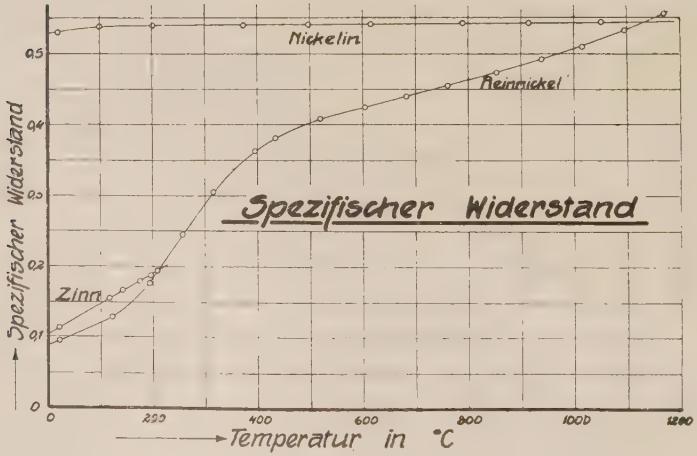


Abb. 34

Die Widerstands-Temperaturkurven von Aluminium Abb. 32 und Zinn Abb. 34 verlaufen bis hinauf zum Schmelzpunkt fast geradlinig. Beinahe genau so verhält sich Silber Abb. 32. Die Widerstands-Temperaturkurven von Eisen Abb. 33 und Kupfer Abb. 32 verlaufen bis gegen 800° C regelmäßig, um dann infolge der Verminderung des leitenden Querschnittes durch die stark anwachsende Oxydation erheblich anzusteigen. Die Ergebnisse der

Untersuchung, die die Oxydation als Ursache der Widerstandsänderung in Abhängigkeit von der Zeit bei verschiedenen Temperaturen zeigt, folgen im Abschnitt VIII.

Den spezifischen Widerstand von Nickelin in Abhängigkeit von der Temperatur zeigt Abb. 34. Der Temperatur-Koeffizient dieser Legierung wird bei höheren Temperaturen kleiner.

Vollkommen abweichend von den anderen Metallen verhält sich Reinnickel, dessen Widerstand nach einem geradlinigen Anstieg bis gegen 120° C bei 160° C stark ansteigt, um bei 400° C fast in die alte Richtung zurückzukehren. Bereits bei 800° C machen sich die Folgen der Oxydation durch eine leichte Krümmung der Widerstands-Temperaturkurve nach oben bemerkbar. Der eigenartige Verlauf des Widerstandes von Reinnickel mit dem Knick bei 150° C und 400° C ist auf einen Umwandlungspunkt im Gefüge des Materials zurückzuführen.

V. Ergebnisse der Rechnung.

1. Berechnung der abgegebenen Watt/cm².

Es bedeutet:

I = Belastungsstrom in Amp.

R = Widerstand des Drahtes pro m bei der Versuchstemperatur t in Ohm.

ϱ = spezifischer Widerstand des Versuchsmaterials bei der Temperatur t. Siehe S. 14.

l = Länge des Versuchsdrahtes in m bei der Versuchstemperatur t.

d = Durchmesser des Versuchsdrahtes in mm.

F = Oberfläche des Versuchsdrahtes in cm².

q = Querschnitt des Versuchsdrahtes in mm².

Die von dem Versuchsdrahte bei der Beharrungstemperatur t pro m abgegebene Wärmemenge ist:

$$I^2 \cdot R = \frac{I^2 \cdot \varrho}{q} = \frac{4 \cdot I^2 \cdot \varrho}{d^2 \cdot \pi}$$

Die Oberfläche des Versuchsdrahtes in cm² pro m bei der Beharrungstemperatur t ist:

$$F = 100 \cdot 0{,}1 \cdot d \cdot \pi = 10 \cdot d \cdot \pi$$

Die von dem Versuchsdrahte bei der Beharrungstemperatur t pro cm² abgegebene Wärmemenge ist:

$$W = \frac{I^2 \cdot R}{F} = \frac{I^2 \cdot \varrho}{2{,}5 \cdot d^3 \cdot \pi^2} = \frac{I^2 \cdot \varrho}{24{,}673 \cdot d^3} \quad (2)$$

Unter Benutzung der Erwärmungs- und Widerstands-Temperaturkurven wurden die abgeführten Watt/cm² W für alle Versuchsdrähte berechnet.

Die Berechnung der Watt/cm² wurde von 100 zu 100° C vorgenommen. Die Ergebnisse der Rechnung sind aus den Abb. 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41 ersichtlich.

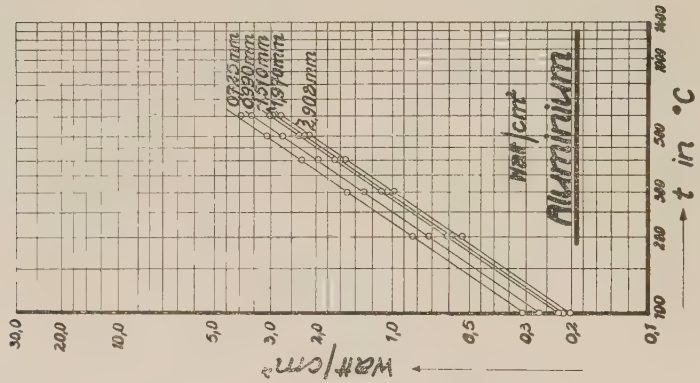


Abb. 35

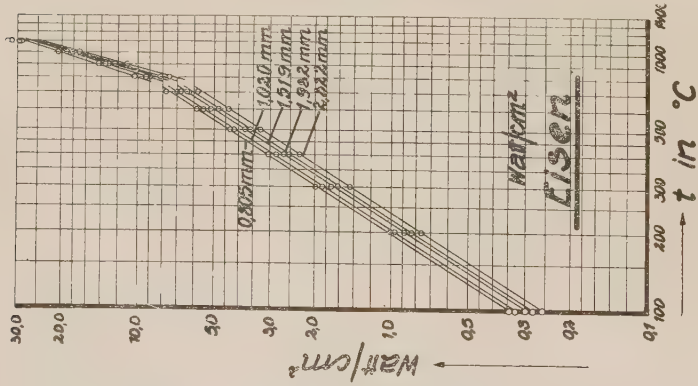


Abb. 36

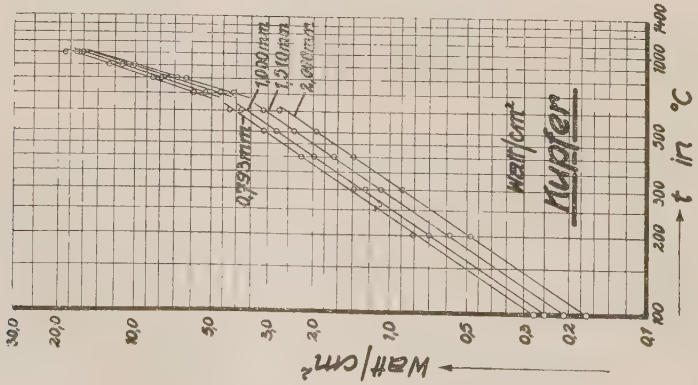


Abb. 37

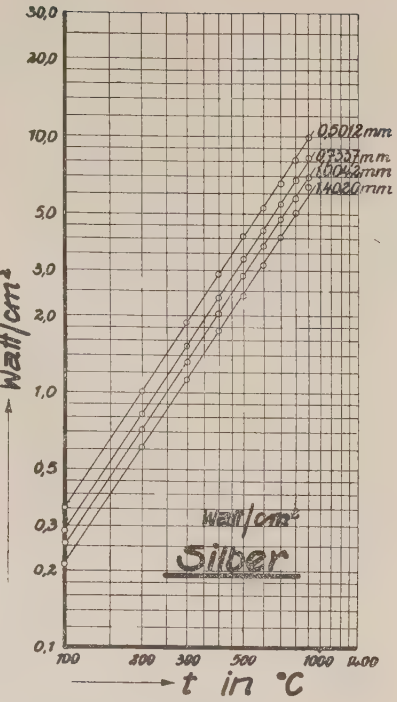


Abb. 40

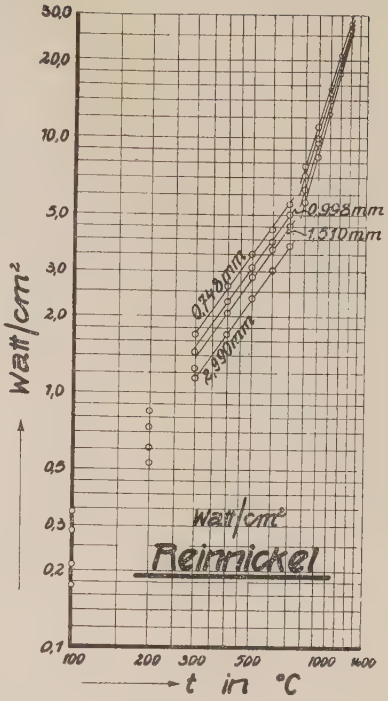


Abb. 39

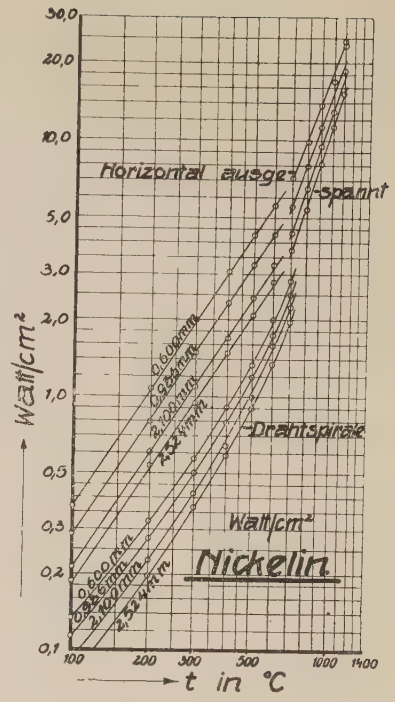


Abb. 38

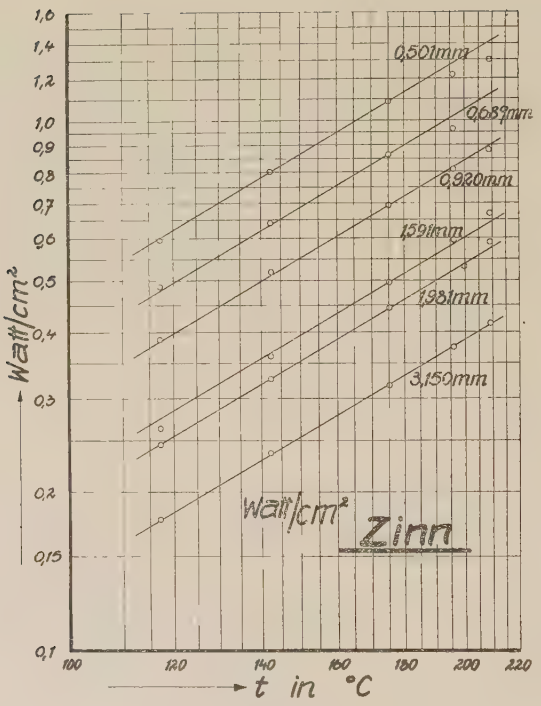


Abb. 41

2. Diskussion der Ergebnisse der Rechnung.

Trägt man die Logarithmen der im vorigen Abschnitt errechneten Watt/cm² W in Abhängigkeit von dem Logarithmus der Versuchstemperatur t auf (Abb. 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41), so kann man feststellen, daß alle Punkte eines Drahtdurchmessers bis gegen 700° C auf einer Geraden und die Werte der anderen Durchmesser auf dazu parallelen Geraden liegen. Über 600° bis 700° C tritt ganz allgemein bei allen untersuchten Metallen, mit Ausnahme von Silber, eine Richtungsänderung zu höheren Werten der Watt/cm² W ein.

Da die Logarithmen der Watt/cm² W eines Durchmessers auf einer Geraden liegen, läßt sich die, in Luft pro cm² Oberfläche abgegebene Wärmemenge für jeden Durchmesser, sowohl unter 700° C, als über 700° C durch folgende Gleichung darstellen:

$$W = C \cdot t^n \qquad (3)$$

Darin bedeutet:

W = in Luft bei der Beharrungstemperatur t abgegebene Watt/cm².
t = Beharrungstemperatur in ° C.
C = Koeffizient.
n = Exponent.

Um die Übersicht über die aufgestellten Beziehungen zu erleichtern, wird folgende Bezeichnungsweise eingeführt:

Die unter 600°—700° C geltenden Bezeichnungen haben den Index 0, z. B. (C_0, m_0, n_0), die über 600°—700° C geltenden den Index 1, z. B. (C_1, m_1, n_1).

Da die Logarithmen der Watt/cm² W aller Durchmesser in Abhängigkeit von der Versuchstemperatur t bis gegen 600°—700° C auf parallelen Geraden liegen, ist der Exponent n_0 für alle Durchmesser eines Materials in diesem Temperaturbereich derselbe und deshalb gleichsam eine für dieses Material charakteristische Größe, die von den Eigenschaften dieses Metalles abhängig ist. Vergleichen wir die Werte für n_0 unter 600° C in der folgenden Tabelle, so müssen wir feststellen, daß n_0 sich für alle untersuchten Metalle in den Grenzen 1,4152 bis 1,5862 um 1.5 bewegt.

Material	n_0
Aluminium	1,4462
Eisen	1,5862
Kupfer	1,5007
Nickelin	1,5009
Reinnickel	1,4152
Silber	1,5153
Zinn	1,4533

Da die Unterschiede von n_0 bei den einzelnen Metallen relativ klein sind, ist die Annahme gerechtfertigt, daß der wesentlichste Faktor der Wärmeabgabe von den Eigenschaften der einzelnen Metalldrähte nahezu unabhängig sein muß. Das trifft für die Konvektion zu.

Dadurch, daß der Versuchsdraht erwärmt wird, teilt er seine Wärme durch Wärmeleitung der ihn zunächst umgebenden Lufthülle mit. Die erwärmte Luft steigt auf und saugt neue, kalte Luft an den Draht. Wird die Temperatur des Drahtes erhöht, so muß eine größere Wärmemenge an die Luft abgegeben werden, obwohl die Oberfläche (unter Vernachlässigung der Wärmeausdehnung!) die gleiche geblieben ist. Das ist nur durch Erhöhung der Windgeschwindigkeit, d. h. der Konvektions-Geschwindigkeit möglich.

Die Geschwindigkeit der Konvektion steigt also mit wachsender Temperatur und kleiner werdendem Durchmesser.

Langmuir vertritt in seiner Arbeit: „Convection and Conduction of Heat in Gases", Physical Reviev of American Physical Soc., Bd. 34, Juni 1912, S. 401, die Ansicht, daß sich besonders bei niedrigen Temperaturen, wo die Strahlung zahlenmäßig wenig ausmacht, die Wärmeleitung und die Konvektion derartig in die Wärmeabgabe teilen, daß die Wärmeleitung im wesentlichen die Ursache der Wärmeabgabe des Drahtes an die Luft ist, während die Konvektionsströme die erwärmte Luft wegschaffen und neue, kalte Luft heranbringen.

Eine Arbeit über „Die künstliche Konvektion am elektrischen Hitzdrahte" von J. S. van Bijlevelt, Diss. T. H. Dresden 1915, versucht eine zahlenmäßige Formulierung der künstlichen Konvektion und gibt eine gute Übersicht über alle bisherigen Arbeiten auf diesem Gebiete. Das Temperatur-Intervall, das Bijlevelt untersucht, reicht bis gegen 300° C, die untersuchten Durchmesser schwanken um 0,2 mm. Bijlevelts Arbeit ist in der Hauptsache eine Winduntersuchung. Er findet, daß die von Langmuir für die natürliche Konvektion aufgestellte Formel bei dünnen Drähten zu kleine Werte ergibt. Dieser Unterschied zwischen Versuchs- und Formelwert wird mit zunehmendem Durchmesser größer und führt bei Drähten über 1 mm Durchmesser und höheren Temperaturen zu groben Ungenauigkeiten.

M. v. Pirani stellt in seiner Arbeit „Über die Messung der wahren Temperatur an Metallen", Verhandlungen der deutschen physikalischen Gesellschaft, Bd. 12, 1910, S. 301, für die im Vakuum abgestrahlte Energie eines Drahtes die Beziehung auf:

$$W = C \cdot T^n$$

W = Gesamtstrahlung in Watt/cm².
T = Absolute Temperatur in °C.
C = Konstante.

M. v. Pirani bestätigt die Gleichung durch Messungen an Platin, Tantal und Wolfram. Er führt die Messungen bis über 2000° C aus, doch sind seine Versuchswerte nach eigenen Angaben erst über 600° C verläßlich.

Eine Untersuchung, die gute Vergleiche mit den Ergebnissen dieser Arbeit zuläßt, ist die von Vernon A. Suydam „Über die Gesamtstrahlung von Metallen", Physikal. Reviev 1915, S. 497. Suydam weist ebenfalls

nach, daß die Gesamtstrahlung W von Metalldrähten im Vakuum mit der absoluten Temperatur T durch die Beziehung

$$W = C \cdot T^n$$

darstellbar ist.

Suydam nimmt seine Versuche bei 0° C in einem mittleren Vakuum von 0,0002 atm. vor, wodurch er die Wärmeleitung und Konvektion, die an das Vorhandensein einer Lufthülle gebunden sind, ausschaltet und übersichtlichere der Rechnung zugänglichere Verhältnisse erhält.

In den folgenden Tabellen wollen wir die von Suydam gefundenen Werte für die Gesamtstrahlung mit denen dieser Arbeit vergleichen. Dort ist deutlich zu sehen, wie gering der Betrag der reinen Wärmestrahlung im Vergleich zu der gesamten in Luft abgegebenen Wärmeenergie ist.

a) Silber.

t °Celsius	W nach Suydam in Watt/cm²	Gesamte in Luft von 20° C abgegebene Wärmeenergie in Watt/cm² (d = 0,5012 mm)
352	0,0875	2,393
424	0,1306	3,155
476	0,1741	3,802
532	0,2595	4,477
596	0,3279	5,309
628	0,3927	5,754
672	0,4739	6,339
708	0,5691	6,872

b) Reinnickel.

t °Celsius	W nach Suydam in Watt/cm²	Gesamte in Luft von 20° C abgegebene Wärmeenergie in Watt/cm² (d = 0,455 mm)
330	0,1000	2,2557
388	0,1526	2,8229
438	0,1935	3,3519
500	0,2408	4,0419
610	0,4488	5,3566
678	0,7012	6,2229
850	1,5499	11,584
908	1,9324	14,114
1010	2,9572	19,411

c) Eisen.

t ° Celsius	W nach Suydam in Watt/cm²	Gesamte in Luft von 20° C abgegebene Wärmeenergie in Watt/cm² (d = 0,805 mm)
423	0,2230	3,350
480	0,3103	4,074
532	0,4362	4,820
580	0,5661	5,521
642	0,7952	6,546
702	1,1604	7,534
810	2,1810	10,590
860	2,7135	12,76
907	3,3628	15,21
960	4,7000	17,99
1030	7,8890	22,65

Die folgende Tabelle gibt die in Tabelle b angegebenen Werte für W (Reinnickel) nach Suydam in Prozenten der in dieser Arbeit gefundenen Werte an:

° Celsius t	W nach Suydam in Prozenten der in Luft von 20° C abgegebenen Wärmeenergie
330	4,44
388	5,40
438	5,77
500	5,96
610	8,40
678	11,28
850	13,38
908	13,70
1010	15,22

Diese Tabelle läßt den Einfluß der Strahlung auf die gesamten in Luft abgegebenen Watt/cm² erkennen. Während bei Temperaturen von einigen hundert Graden Celsius der Anteil der Strahlung an der gesamten Wärmeabgabe nur wenige Prozent beträgt, steigt dieser Prozentsatz erst bei höheren Temperaturen wesentlich an.

Das Gesetz von Stefan und Boltzmann gibt uns die Möglichkeit, die Wärmestrahlung eines Metalldrahtes im Vakuum rechnerisch zu erfassen. Ein ähnliches Gesetz, das die gesamte in Luft abgegebene Wärmeenergie (Strahlung + Wärmeleitung + Konvektion) eines Metalldrahtes in Beziehung zur Temperatur bringt, gibt es von derart allgemeiner Gültigkeit nicht.

Wenn wir uns damit beschäftigen, für diese Verhältnisse eine empirische Beziehung aufzustellen, so müssen wir bedenken, daß dieselbe bei der Vielheit von Einflüssen (Oxydation, Wärmestrahlung, Wärmeleitung, Konvektion u. a.) nicht von so einfacher Natur sein wird, wie das Stefan-Boltzmannsche Gesetz, das nur für den speziellen Fall der reinen Strahlung gilt. Die zu suchende Beziehung wird rein empirischen Charakter haben und der mathematischen Herleitung, mit Rücksicht auf die vielen, nicht erfaßbaren Komponenten der Wärmeabgabe, schwer zugänglich sein.

Bereits an früherer Stelle (S. 48) wurde gezeigt, daß sich die Wärmeabgabe aller in dieser Arbeit untersuchten Drähte durch folgende Gleichung darstellen läßt:

$$W = C \cdot t^n$$

Für alle Durchmesser jedes Metalles ist n bis in die Gegend von 600°—700° C konstant. Die Logarithmen der Watt/cm² W der einzelnen Durchmesser liegen also auf parallelen Geraden. Der Abstand dieser Geraden untereinander wird in eindeutiger Weise durch den Koeffizienten C beschrieben. Dessen Logarithmen liegen (siehe Abb. 43, 44, 46, 47, 48, 49) im Bereiche der in dieser Arbeit untersuchten Durchmesser von 0,5—3,0 mm, in Abhängigkeit von dem Logarithmus des Drahtdurchmessers d aufgetragen, ebenfalls auf einer Geraden. Von allen sieben untersuchten Metallen macht nur das Aluminium eine Ausnahme, dessen Logarithmus C mit dem Logarithmus des Drahtdurchmessers d in keiner linearen Beziehung steht. (Siehe Abb. 42.)

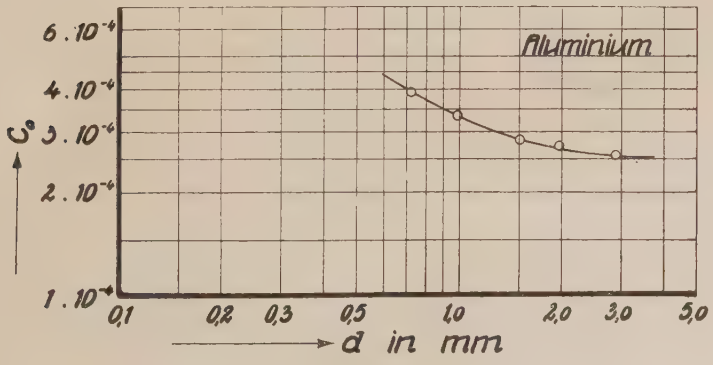


Abb. 42

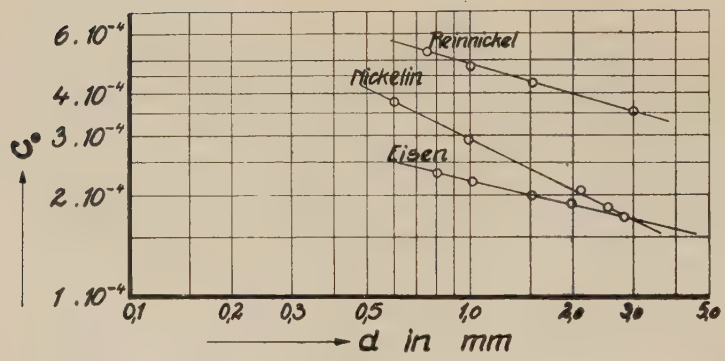


Abb. 43

Für den Koeffizienten C_0 aller Metalle, Aluminium ausgenommen, gilt also:

$$C_0 = c_0 \cdot d^{m_0} \qquad (4)$$

C_0 ist daher selbst abhängig von d. Setzen wir C_0 in Gleichung (3) ein, so erhalten wir:

$$W = C_0 \cdot t^{n_0} = c_0 \cdot d^{m_0} \cdot t^{n_0} \qquad (5)$$

Diese Gleichung beschreibt für alle Durchmesser innerhalb 0,6 mm und 3,0 mm und alle Temperaturen zwischen 100° und 700° C die in Luft abgegebenen Watt/cm² W eines Metalles, wenn wir C_0, m_0 und n_0 kennen.

Diese Konstanten wurden für alle untersuchten Metalldrähte bestimmt und sind bei der Zusammenfassung der Versuchsergebnisse der einzelnen Metalle auf S. 59 zu finden. Um die Formel (5) der praktischen Berechnung leichter zugänglich zu machen, wurden für alle Metalle und den Temperaturbereich 100°—700° C Rechentafeln (Nomogramme) aufgestellt (Abb. 51, 53, 54, 55, 56, 57, 58), die eine schnelle und genaue Bestimmung von W in Abhängigkeit vom Durchmesser d und der Beharrungstemperatur t gestatten.

Über 600° C liegen die Verhältnisse nicht so einfach, da durch die stark wachsende Oxydation schwer erfaßbare Materialumänderungen hervorgerufen werden. So dürfte der starke Anstieg der Watt/cm² W über 600°—700° C zum größten Teile in der Vergrößerung des Durchmessers durch die Oxydation seine Ursache haben. Dadurch wird die Oberfläche größer und damit die Ventilationsverhältnisse besser. Da wir aber, infolge der Unregelmäßigkeiten der Oxydation (Risse, Sprünge usw.), nicht in der Lage sind, die Oberfläche des oxydierten Drahtes im glühenden Zustande zu bestimmen, wurden in dieser Untersuchung

alle Berechnungen auf den kalten Durchmesser bezogen. (Siehe S. 18, 19, 20.) Dadurch kommt es, daß W bei Temperaturen über 600°—700° C zu große Werte annimmt, weil wir die Beträge der Wärmeabgabe der größeren oxydierten Oberfläche des Drahtes auf die kalte, nicht oxydierte Oberfläche beziehen. Diese Verhältnisse drücken sich deutlich in den Abb. für W der einzelnen Metalle aus. (Abb. 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41.)

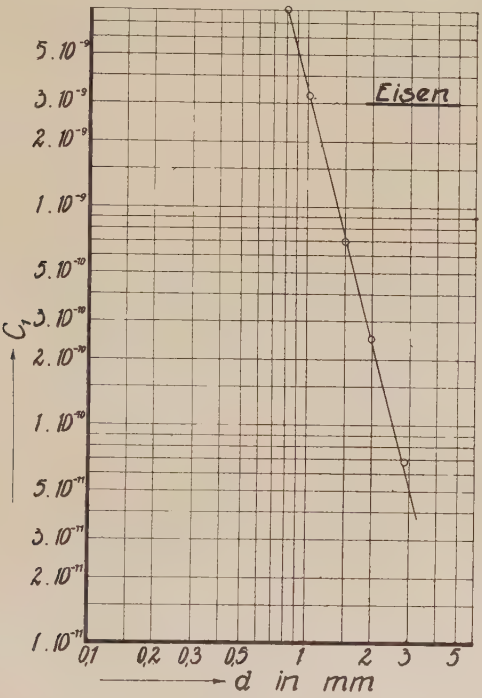


Abb. 44

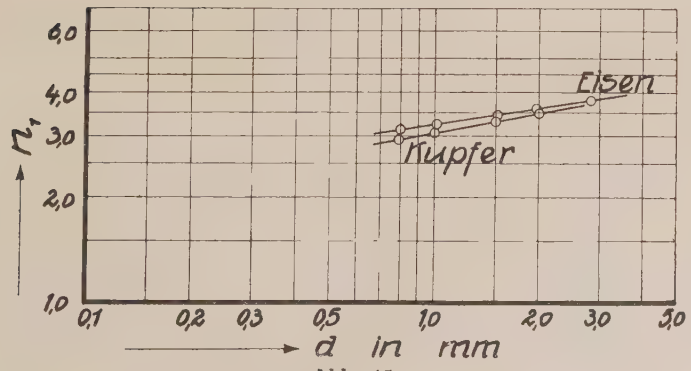


Abb. 45

Die mathematische Erfassung auch dieser Werte hat keinen bleibenden Wert, weil die Verhältnisse, ganz besonders bei den Temperaturen über 900°—1000° C, durch die Oxydation allzu stark in Abhängigkeit von der Zeit geändert werden. Doch läßt sich auch hier zeigen, daß eine, wenn auch nicht so einfache Gesetzmäßigkeit wie unter 600° C zwischen den Werten der einzelnen Durchmesser besteht.

Durch die Werte der log Watt/cm² W über 600°—700° C läßt sich ebenfalls angenähert eine Gerade legen, die Watt/cm² W also durch die Gleichung

$$W = C_1 \cdot t^{n_1} \qquad (3a)$$

darstellen.

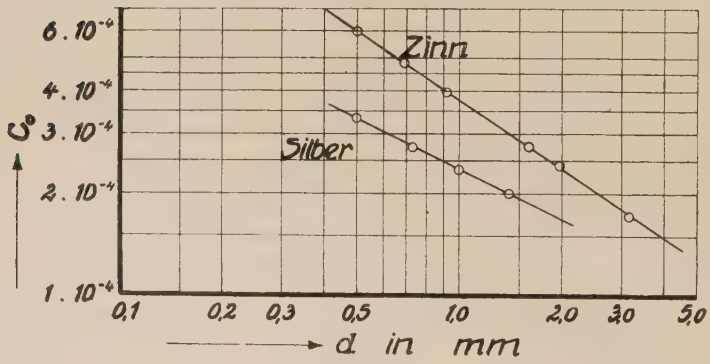


Abb. 46

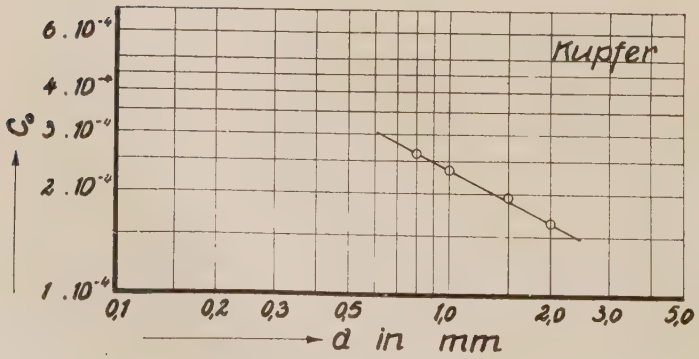


Abb. 47

Bei Betrachtung der Abbildungen erkennt man, daß über 600°—700° C nicht nur C_1 (Abb. 44, 48, 49) eine Funktion des Durchmessers d ist, sondern auch n_1 (Abb. 45, 50). Es ist interessant, daß sich auch die Funktion $n_1(d)$ logarithmiert als eine Gerade herausstellt.

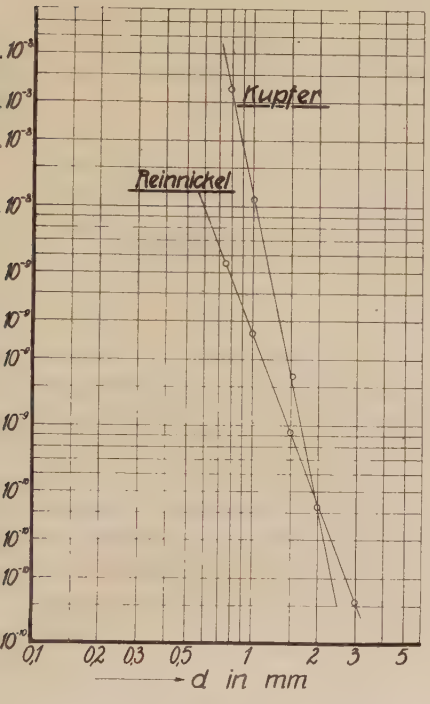


Abb. 48

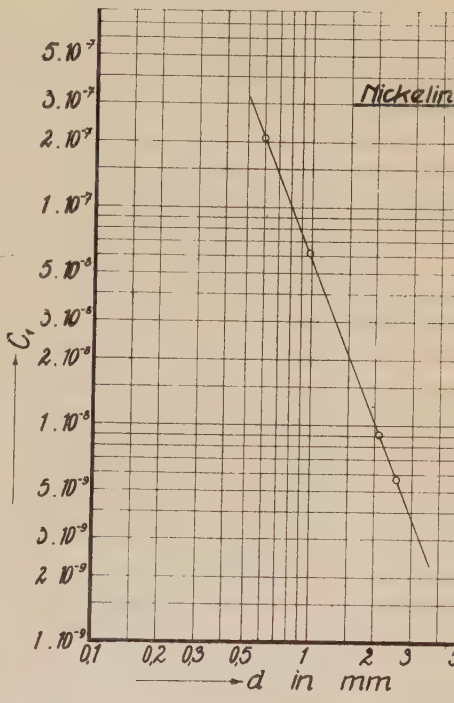


Abb. 49

Für C_1 gilt hier wie unter 600° C:

$$C_1 = c_1 \cdot d^{m_1} \qquad (4a)$$

Außerdem ist:

$$n_1 = b \cdot d^s \qquad (6)$$

Durch die Koeffizienten c_1, m_1 und die Exponenten b_1 und s, die sich für jedes Material bestimmen lassen, sind die in Luft abgegebenen Watt/cm² W für Temperaturen über 600°—700° C und alle Durchmesser innerhalb 0,6 mm und 3,0 mm erfaßt. Allerdings kann man von diesen Gleichungen für Temperaturen über 900°—1000° C, besonders nach längerer Belastung des Versuchsdrahtes, nicht jenen Genauigkeitsgrad verlangen, wie unter 600°—700° C, weil hier die chemischen Veränderungen der Drahtoberfläche

mit größerer Heftigkeit vor sich gehen und dadurch unberechenbare Verhältnisse geschaffen werden, von denen in einem besonderen Abschnitt (S. 81) berichtet wird.

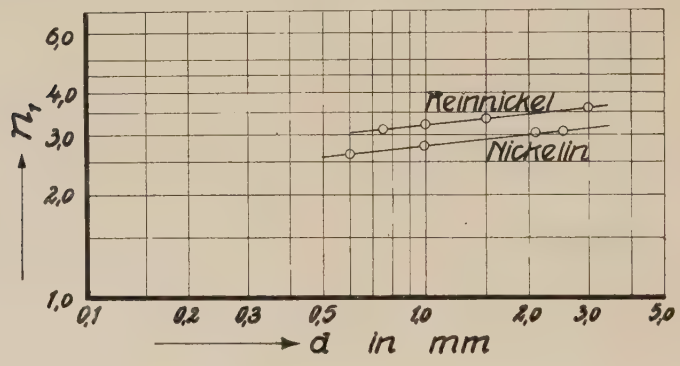


Abb. 50

Die Beziehungen (3), (4) geben uns in Verbindung mit der Beziehung (2) die Möglichkeit, aus dem Belastungsstrom I die Temperatur t des Drahtes im Beharrungszustande zu berechnen.

Die für einen beliebigen Versuchsdraht in Luft abgegebenen Watt/cm² W sind im Bearrungszustande bei der Temperatur t, wenn

I = der Belastungsstrom in Amp.,

ϱ = der spezifische Widerstand bei der Temperatur t,

d = der Durchmesser des Drahtes in mm ist,

$$W = \frac{I^2 \cdot \varrho}{24{,}673 \cdot d^3} \tag{2}$$

Unter Benutzung der Gleichung (3) erhalten wir:

$$C \cdot t^n = \frac{I^2 \cdot \varrho}{24{,}673 \cdot d^3}$$

und

$$t = \sqrt[n]{\frac{I^2 \cdot \varrho}{24{,}673 \cdot C \cdot d^3}} \tag{7}$$

Der Belastungsstrom I ist demnach:

$$I = \sqrt{\frac{24{,}673 \cdot C \cdot d^3 \cdot t^n}{\varrho}} \tag{8}$$

Die Gleichungen (7), (8) gelten für das gesamte Temperaturgebiet über 100° C.

Unter Benutzung der Gleichung (4)

$$C_0 = c_0 \cdot d^{m_0}$$

erhalten wir für die Beharrungstemperatur

$$t = \sqrt[n_0]{\frac{I^2 \cdot \varrho}{24{,}673 \cdot c_0 \cdot d^{3+m_0}}} \qquad (9)$$

und für den Erwärmungsstrom:

$$I = \sqrt{\frac{24{,}673 \cdot c_0 \cdot d^{3+m_0} \cdot t^{n_0}}{\varrho}} \qquad (10)$$

Die Gleichungen (9), (10) gelten für den Temperaturbereich zwischen 100° und 600°—700° C, je nachdem, ob die Koeffizienten c_0, m_0, n_0 bis 600° oder 700° C errechnet wurden, was aus den später folgenden Tabellen (S. 59) für jedes Metall zu ersehen ist.

Um eine einfache und schnelle Berechnung von I und t in dem Temperaturbereich von 100°—700° C zu ermöglichen, wurden für die Gleichungen (9), (10) und alle untersuchten Metalle Nomogramme aufgestellt. (Abb. 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58.)

Wesentlich komplizierter werden die Gleichungen für das Temperaturgebiet über 600°—700° C, so daß es für den praktischen Gebrauch vorteilhaft ist, Gleichung (7), (8) zu benutzen und die Koeffizienten und Exponenten den Abbildungen 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50 zu entnehmen.

Die Gleichungen (7), (9) sind für die Berechnung von t nur bedingt brauchbar, weil sie ϱ enthalten, das selbst eine Funktion der Drahttemperatur ist. Da wir den Verlauf von ϱ (t) graphisch, nicht aber als Gleichung kennen, so empfiehlt sich in diesem Falle die Benutzung der Nomogramme (S. 64) Abb. 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58.

3. Koeffizienten und Exponenten.

a) Aluminium.

Abb. 35 zeigt den geradlinigen Verlauf der Logarithmen der Watt/cm² W in Abhängigkeit vom Logarithmus der Temperatur t. Um die Möglichkeit einer Berechnung der Watt/cm² W nach der Gleichung

$$W = C_0 \cdot t^{n_0}$$

zu schaffen, wurde n_0 und C_0 berechnet. C_0 ist in Abb. 42 in Abhängigkeit von d aufgetragen. Während bei sämtlichen übrigen untersuchten Metallen dieser Zusammenhang von der Form

$$C_0 = c_0 \cdot d^{m_0}$$

war, macht das Aluminium eine Ausnahme. Deshalb wurde

von der Aufstellung einer Gleichung zwischen C_0 und d abgesehen. Die folgende Tabelle gibt den Koeffizienten C_0 und Exponenten n_0 in Abhängigkeit vom Durchmesser d:

d	C_0	n_0
in mm	Abb. 42	
0,725	$3{,}9500 \cdot 10^{-4}$	1,4462
0,990	$3{,}3651 \cdot 10^{-4}$	1,4462
1,510	$2{,}8581 \cdot 10^{-4}$	1,4462
1,970	$2{,}7213 \cdot 10^{-4}$	1,4462
2,908	$2{,}5819 \cdot 10^{-4}$	1,4462

b) Eisen.

Die Watt/cm² W für Eisen sind auf Abb. 36 dargestellt. Die Koeffizienten und Exponenten wurden in zwei Gruppen geteilt: Diejenigen, die zwischen 100° und 700° C (c_0, m_0, n_0) und diejenigen, die über 700° C gelten (b, c_1, m_1, s).

Gültig von 100°—700° C.

d	C_0	n_0
in mm	Abb. 43	
0,805	$2{,}2956 \cdot 10^{-4}$	1,5862
1,020	$2{,}1783 \cdot 10^{-4}$	1,5862
1,519	$1{,}9815 \cdot 10^{-4}$	1,5862
1,982	$1{,}8789 \cdot 10^{-4}$	1,5862
2,822	$1{,}7175 \cdot 10^{-4}$	1,5862

Gültig über 700° C.

d	C_1	n_1
in mm	Abb. 44	Abb. 45
0,805	$8{,}0223 \cdot 10^{-9}$	3,1369
1,020	$3{,}2139 \cdot 10^{-9}$	3,2589
1,519	$6{,}9210 \cdot 10^{-10}$	3,4762
1,982	$2{,}5021 \cdot 10^{-10}$	3,6219
2,822	$6{,}8132 \cdot 10^{-11}$	3,7979

Da der Zusammenhang zwischen log C_0, log C_1, log n_1 einerseits und log d andererseits linear ist (Abb. 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48, 49, 50) lassen sich diese Koeffizienten und Exponenten für alle Durchmesser d, die innerhalb der in dieser Arbeit untersuchten liegen, durch folgende Gleichungen darstellen:

$$C_0 = c_0 \cdot d^{m_0} \qquad (4)$$

$$C_1 = c_1 \cdot d^{m_1} \qquad (4a)$$

$$n_1 = b \cdot d^{s} \qquad (6)$$

Die neuen Koeffizienten und Exponenten gestatten mit Hilfe der Gleichungen (5) und (7) bis (10) eine genaue Bestimmung von W, I und t. Um die Rechnung möglichst zu vereinfachen, wird in der 3. Rubrik der folgenden Tabelle der Logarithmus angegeben:

	Wert	Logarithmus	Geltungsbereich in °C
c_0	$2{,}1832 \cdot 10^{-4}$	6,33910—10	100—700
m_0	-0,23127	9,36413—10	100—700
c_1	$3{,}4811 \cdot 10^{-9}$	1 54171—10	über 700
m_1	-3,8486	0,58531	über 700
b	3,2424	0,51086	über 700
s	0,15244	9,18308—10	über 700

c) Kupfer.

Abb. 37 zeigt die Logarithmen der Watt/cm² W in Abhängigkeit vom Logarithmus der Beharrungstemperatur t.

Gültig von 100°—600° C.

d in mm	C_0 Abb. 47	n_0
0,793	$2{,}6434 \cdot 10^{-4}$	1,5007
1,000	$2{,}3674 \cdot 10^{-4}$	1,5007
1,510	$1{,}9860 \cdot 10^{-4}$	1,5007
2,000	$1{,}6453 \cdot 10^{-4}$	1,5007

Gültig über 600° C.

d in mm	C_1 Abb. 48	n_1 Abb. 45
0,793	$3{,}4862 \cdot 10^{-8}$	2,9340
1,000	$1{,}0301 \cdot 10^{-8}$	3,0591
1,510	$1{,}6964 \cdot 10^{-9}$	3,3161
2,000	$4{,}2580 \cdot 10^{-10}$	3,5098

Für die Rechnung mit den Gleichungen (3) bis (10) wurden folgende Koeffizienten und Exponenten bestimmt:

	Wert	Logarithmus	Geltungsbereich in °C
c_0	$2{,}9480 \cdot 10^{-4}$	6,46953—10	100—600
m_0	-0,50039	9,69931—10	100—600
c_1	$1{,}1551 \cdot 10^{-8}$	2,06261—10	über 600
m_1	-4,7617	0,67776	über 600
b	3,0698	0,48711	über 600
s	0,19327	0,28617—10	über 600

d) Nickelin.

Abb. 38 zeigt die Logarithmen der Watt/cm² W in Abhängigkeit vom Logarithmus der Belastungstemperatur t.

Gültig von 100°—600° C.

d in mm	C_0 Abb. 43	n_0
0,600	$3{,}7374 \cdot 10^{-4}$	1,5009
0,986	$2{,}8906 \cdot 10^{-4}$	1,5009
2,100	$2{,}0750 \cdot 10^{-4}$	1,5009
2,524	$1{,}8432 \cdot 10^{-4}$	1,5009

Gültig über 600° C.

d in mm	C_1 Abb. 49	n_1 Abb. 50
0,600	$2{,}0860 \cdot 10^{-7}$	2,6469
0,986	$6{,}2121 \cdot 10^{-8}$	2,7983
2,100	$9{,}2111 \cdot 10^{-9}$	3,0481
2,524	$5{,}6572 \cdot 10^{-10}$	3,0988

Die Koeffizienten und Exponenten für die Rechnung mit den Gleichungen (3) — (10) sind:

	Wert	Logarithmus	Geltungsbereich in °C
c_0	$2{,}9067 \cdot 10^{-4}$	6,46341—10	100—600
m_0	-0,49209	9,69200—10	100—600
c_1	$5{,}7850 \cdot 10^{-8}$	2,76230—10	über 600
m_1	-2,5110	0,39985	über 600
b	2,7994	0,44707	über 600
s	0,10972	9,04030—10	über 600

e) Reinnickel.

Auf Abb. 38 sind die Watt/cm² W für Reinnickel dargestellt. Es zeigt sich, daß der bei allen anderen untersuchten Metallen vorhandene geradlinige Zusammenhang zwischen log W und log d bis gegen 300° C nicht vorhanden ist. Die Ursache dieser Unregelmäßigkeit ist ein Umwandlungspunkt des Versuchsmaterials, dessen Vorhandensein deutlich aus der Widerstandskurve Abb. 34 hervorgeht.

Gültig von 300°—700° C.

d in mm	C_0 Abb. 43	n_0
0,748	$5{,}2914 \cdot 10^{-4}$	1,4152
0,998	$4{,}7537 \cdot 10^{-4}$	1,4152
1,510	$4{,}2798 \cdot 10^{-4}$	1,4152
2,990	$3{,}5123 \cdot 10^{-4}$	1,4152

Gültig über 700° C.

d in mm	C_1 Abb. 48	n_1 Abb. 50
0,748	$5{,}4778 \cdot 10^{-9}$	3,1518
0,998	$2{,}6542 \cdot 10^{-9}$	3,2471
1,510	$9{,}3128 \cdot 10^{-10}$	3,3869
2,990	$1{,}5603 \cdot 10^{-10}$	3,6346

Für die Berechnung mit den Gleichungen (3) — (10) gelten folgende Koeffizienten und Exponenten:

	Wert	Logarithmus	Geltungsbereich in °C
c_0	$4{,}8559 \cdot 10^{-4}$	6,68627—10	300—700
m_0	-0,29576	9,47094—10	300—700
c_1	$2{,}5984 \cdot 10^{-9}$	1,41470—10	über 700
m_1	-2,5681	0,40961	über 700
d	3,2474	0,51154	über 700
s	0,10050	9,01219—10	über 700

f) Silber.

Die Watt/cm² W von Silber sind in Abhängigkeit von der Beharrungstemperatur t in Abb. 40 aufgetragen. Während bei allen untersuchten Metallen in der Gegend 600°—700° C durch die Oxydation eine Änderung zu größeren Werten von W auftritt, ist W bei Silber durch den Wegfall der Oxydation bis zum Schmelzpunkt geradlinig. Der in der folgenden Tabelle angegebene Koeffizient C_0 und Exponent n_0 ist deshalb:

Gültig von 100°—900° C.

d in mm	C_0 Abb. 46	n_0
0,5012	$3{,}3264 \cdot 10^{-4}$	1,5153
0,7337	$2{,}6957 \cdot 10^{-4}$	1,5153
1,0042	$2{,}3314 \cdot 10^{-4}$	1,5153
1,4020	$1{,}9872 \cdot 10^{-4}$	1,5153

Für die Rechnung mit den Gleichungen (3) — (10) gelten folgende Koeffizienten und Exponenten:

	Wert	Logarithmus	Geltungsbereich in °C
c_0	$2{,}3537 \cdot 10^{-4}$	6,37175—10	100—900
m_0	-0,50081	9,69967—10	100—900

g) Zinn.

Die Watt/cm² W von Zinn sind in Abhängigkeit vom Logarithmus der Beharrungstemperatur t auf Abb. 41 aufgetragen.

Gültig von 100°—210° C.

d in mm	C_0 Abb. 46	n_0
0,501	$5{,}9854 \cdot 10^{-4}$	1,4533
0,689	$4{,}7520 \cdot 10^{-4}$	1,4533
0,920	$3{,}8159 \cdot 10^{-4}$	1,4533
1,591	$2{,}7311 \cdot 10^{-4}$	1,4533
1,981	$2{,}4393 \cdot 10^{-4}$	1,4533
3,150	$1{,}7453 \cdot 10^{-4}$	1,4533

Für die Rechnung mit den Gleichungen (3) — (10) gelten folgende Koeffizienten und Exponenten:

	Wert	Logarithmus	Geltungsbereich in °C
c_0	$3{,}7655 \cdot 10^{-4}$	6,57582—10	100—210
m_0	-0,67020	9,82620—10	100—210

4. Die Nomogramme.

Auf Grund der errechneten Gleichungen, Koeffizienten und Exponenten wurden für den Temperaturbereich von 100°—700° C (für Silber bis 900° C) für alle Versuchsmaterialien Nomogramme aufgestellt, die einen Zusammenhang zwischen dem Belastungsstrom I, der Beharrungs-Temperatur t, dem Durchmesser d und den Watt/cm² W geben. Die Genauigkeit der Nomogramme reicht für die Anforderungen der Praxis aus und läßt sich sowohl an den gemessenen Erwärmungskurven als auch an den errechneten Watt/cm² W kontrollieren. Mittels der Nomogramme Abb. 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58 lassen sich folgende 7 Aufgaben lösen:

a) **Gesucht: W.** **Gegeben: t, d.**
Beispiel: Aluminium. t = 300° C, d = 1,510 mm.

Siehe Abb. 51. Verbinde t = 300° C (Skala t) mit d = 1,510 mm (Skala d) durch eine Gerade. Der Schnittpunkt derselben auf Skala W gibt das Resultat:

W = 1,1 Watt/cm².

b) **Gesucht: t.** **Gegeben: W, d.**
Beispiel: Eisen. W = 3,4 Watt/cm², d = 1,020 mm.

Siehe Abb. 53. Verbinde W = 3,4 Watt/cm² (Skala W) mit d = 1.020 mm (Skala d) durch eine Gerade. Der Schnittpunkt derselben auf Skala t gibt das Resultat:

t = 444° C.

c) **Gesucht: d.** **Gegeben: W, t.**
Beispiel: Kupfer. W = 2,0 Watt/cm², t = 400° C.

Siehe Abb. 54. Verbinde W = 2,0 Watt/cm² (Skala W) mit t = 400° C (Skala t) durch eine Gerade. Der Schnittpunkt derselben auf Skala d gibt das Resultat:

d = 0,96 mm.

d) **Gesucht: I.** **Gegeben: d, t.**
Beispiel: Silber. d = 1,4024 mm,
t = 700° C.

Siehe Abb. 57. Verbinde d = 1,4024 mm (Skala d) mit t = 700° C (Skala t) durch eine Gerade. Deren Schnittpunkt mit Skala Z (2,9) verbinde mit 700° C (Skala ϱ = f [t]) durch eine Gerade, die die Skala I zwischen 60 und 70 schneidet. Der Belastungsstrom I ist also 66 Amp.

e) **Gesucht: t.** **Gegeben: I, d.**
Beispiel: Reinnickel. I = 65 Amp.,
d = 2,99 mm.

Da ϱ eine Funktion der Temperatur ist, läßt sich diese Aufgabe nur durch Angleichung auf folgendem Wege lösen:

Siehe Abb. 56. t wird beliebig angenommen zu t = 300° C. Verbinde 300° C (Skala ϱ = f [t]) mit I = 65 Amp. (Skala I) durch eine Gerade. Deren Schnittpunkt auf Skala Z (2,7) verbinde mit d = 2,99 mm (Skala d) durch eine Gerade. Der Schnittpunkt derselben mit der Skala t liegt bei t = 430° C.

Nun wird das gleiche Verfahren für t = 430° C wiederholt. Verbinde 430° C (Skala ϱ = f[t]) mit I = 65 Amp. (Skala I) durch eine Gerade. Deren Schnittpunkt mit Skala Z (1,9) verbinde mit d = 2,99 mm (Skala d) durch eine Gerade. Der Schnittpunkt derselben mit der Skala t liegt bei t = 520° C. Dieser Wert liegt bereits in nächster Nähe der richtigen Temperatur. Wiederholt man dieses Verfahren noch ein drittes Mal (siehe Abb. 56), so findet man t = 545° C und damit praktisch hinreichend genau die gesuchte Temperatur.

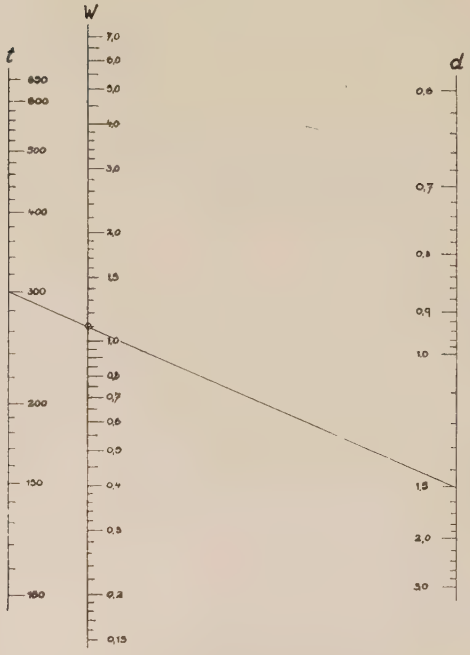
f) **Gesucht: d.** **Gegeben: I, t.**
Beispiel: Zinn. I = 4,0 Amp.,
t = 150° C.

Siehe Abb. 58. Verbinde 150° C (Skala ϱ = f [t]) mit I = 4,0 Amp. (Skala I) durch eine Gerade. Deren Schnittpunkt mit der Skala Z (16,0) verbinde mit t = 150° C (Skala t) durch eine Gerade, welche die Skala d bei d = 0,5 mm schneidet. Der gesuchte Durchmesser ist also d = 0,5 mm.

g) **Gesucht: W.** **Gegeben: I, d.**

Bestimme zuerst nach Aufgabe e) die Temperatur t und hierauf nach Aufgabe a) das gesuchte W.

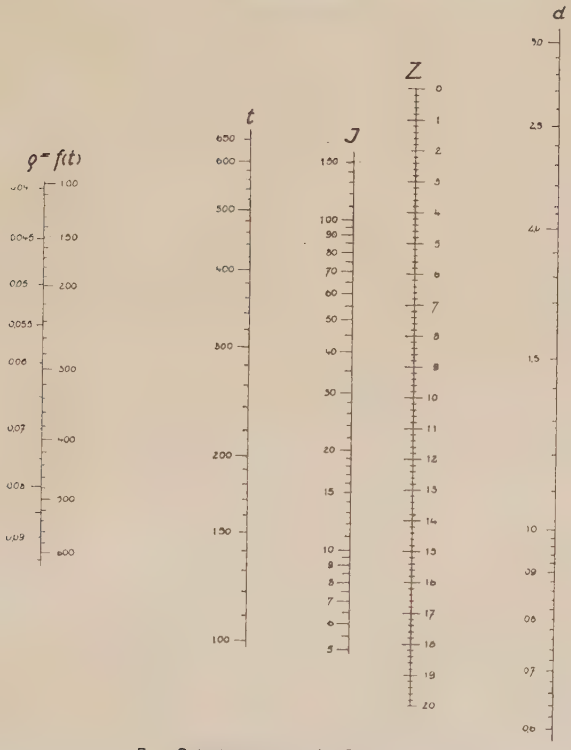
An Luft abgegebene Watt pro cm² Oberfläche. Aluminium.



t Beharrungstemperatur des Drahtes in °C.
d Durchmesser des Drahtes in mm.
W An Luft abgegebene Watt/cm² Oberfläche.

Abb. 51

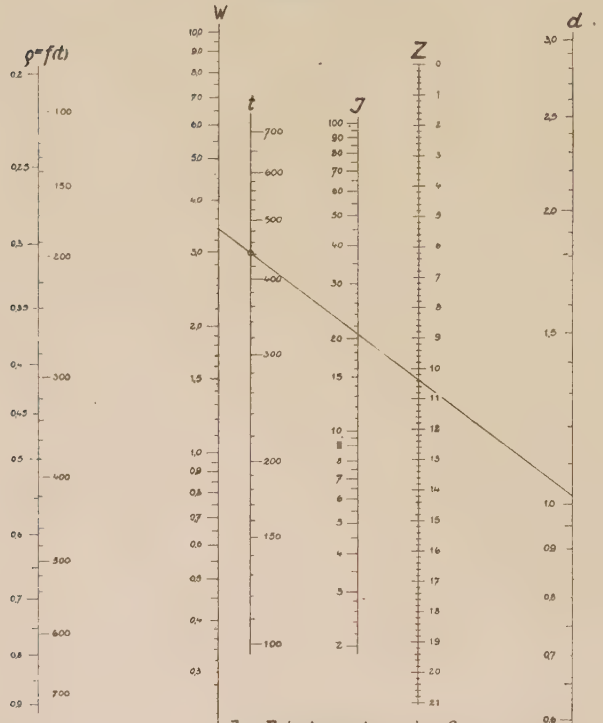
Belastungsstrom und Beharrungstemperatur. Aluminium.



J Belastungsstrom in Amp.
t Beharrungstemperatur des Drahtes in °C.
d Durchmesser des Drahtes in mm.
ϱ Spezifischer Widerstand.
Z Hilfsmassstab.

Abb. 52

Belastungsstrom und Beharrungstemperatur.
Eisen.



J Belastungsstrom in Amp.
t Beharrungstemperatur des Drahtes in °C.
d Durchmesser des Drahtes in mm.
φ Spezifischer Widerstand.
W An Luft abgeführte Watt/qm² Oberfläche.
Z Hilfsmasstab.

Abb. 53

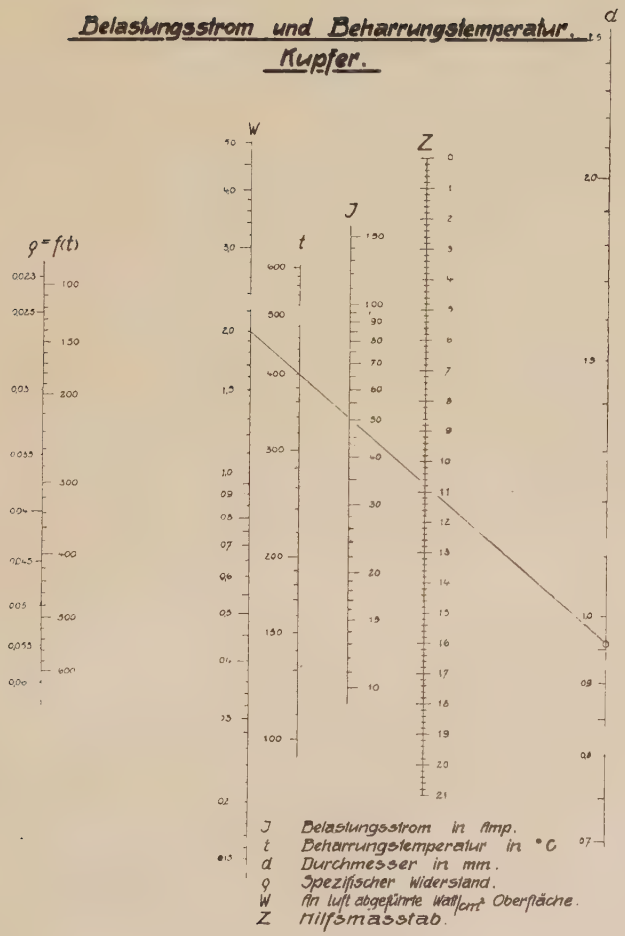

Belastungsstrom und Beharrungstemperatur. Kupfer.
W
Z
J
t
d
ϱ = f(t)
J Belastungsstrom in Amp.
t Beharrungstemperatur in °C
d Durchmesser in mm.
ϱ Spezifischer Widerstand.
W An Luft abgeführte Watt/qcm Oberfläche.
Z Hilfsmasstab.

Abb. 54

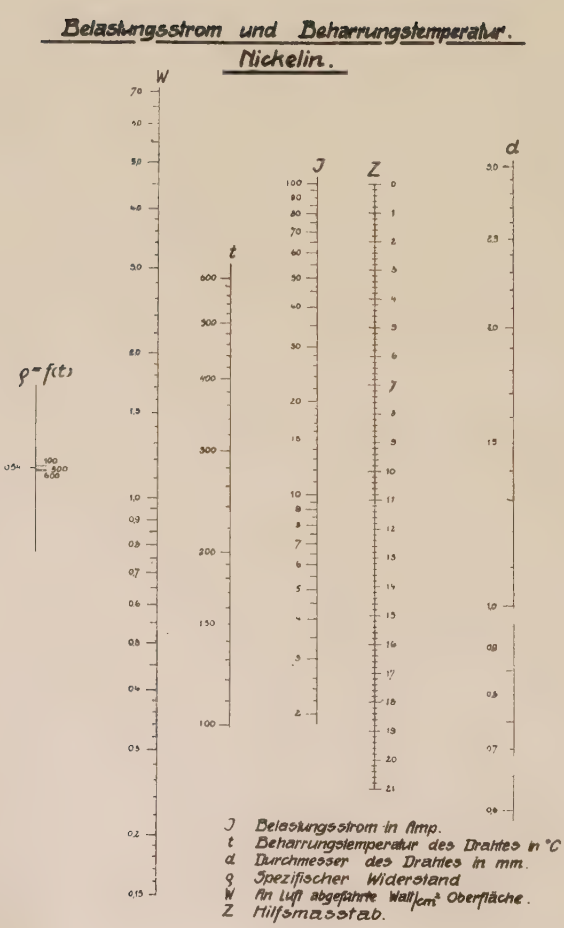
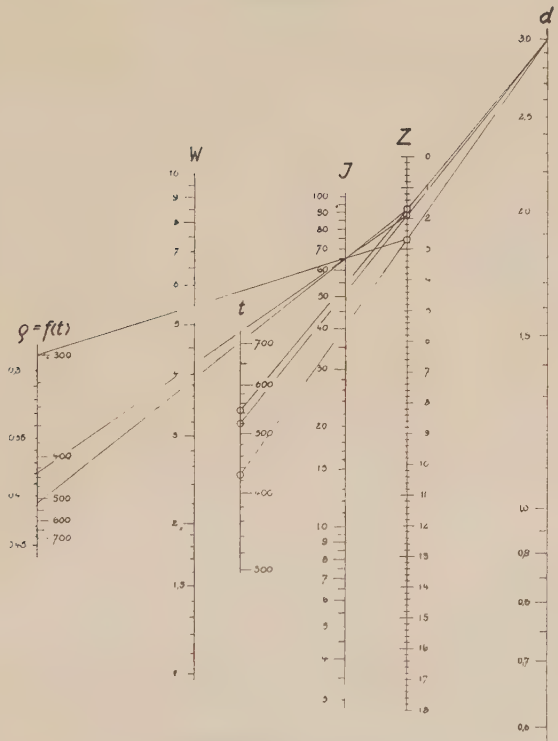

Belastungsstrom und Beharrungstemperatur.
Nickelin.
W
J
Z
t
d
ρ = f(t)
J Belastungsstrom in Amp.
t Beharrungstemperatur des Drahtes in °C
d Durchmesser des Drahtes in mm.
ρ Spezifischer Widerstand
W An Luft abgegebene Watt/cm² Oberfläche.
Z Hilfsmasstab.

Abb. 55

Belastungsstrom und Beharrungstemperatur. Reinnickel.



J Belastungsstrom in Amp.
t Beharrungstemperatur des Drahtes in °C.
d Durchmesser des Drahtes in mm.
ϱ Spezifischer Widerstand
W An Luft abgegebene Watt/cm² Oberfläche.
Z Hilfsmaßstab.

Abb. 56

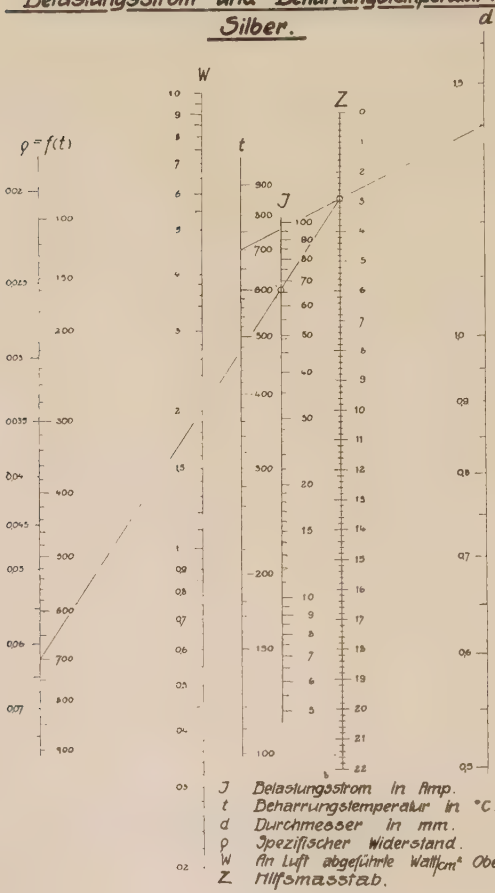
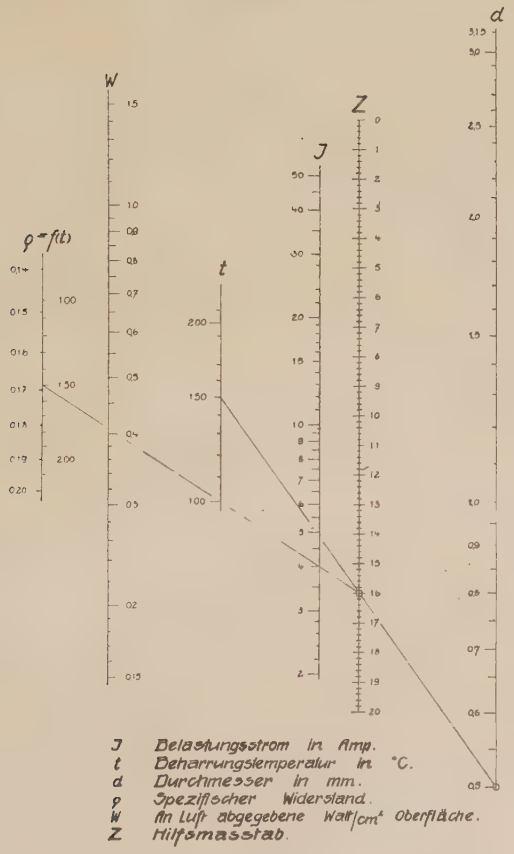

Belastungsstrom und Beharrungstemperatur.
Silber.
ρ = f(t)
W
t
J
Z
d
J Belastungsstrom in Amp.
t Beharrungstemperatur in °C.
d Durchmesser in mm.
ρ Spezifischer Widerstand.
W An Luft abgeführte Watt/cm² Oberfläche.
Z Hilfsmasstab.

Abb. 57

Belastungsstrom und Beharrungstemperatur. Zinn.



J Belastungsstrom in Amp.
t Beharrungstemperatur in °C.
d Durchmesser in mm.
ρ Spezifischer Widerstand.
W An Luft abgegebene Watt/cm² Oberfläche.
Z Hilfsmassstab.

Abb. 58

5. Über die allgemeine Gültigkeit der aufgestellten Gleichungen und Nomogramme.

Es erhebt sich die Frage, inwieweit die Ergebnisse dieser Rechnung allgemeine Gültigkeit haben. Da die, in dieser Gleichung für die Rechnung mit den aufgestellten Gleichungen und Nomogrammen bestimmten Koeffizienten und Exponenten nur von den chemischen und physikalischen Eigenschaften der untersuchten Metalle abhängig sind, so wird die Vorausberechnung für irgend einen Draht um so bessere Ergebnisse liefern, je mehr derselbe mit dem hier untersuchten in seinen chemischen und physikalischen Eigenschaften übereinstimmt.

Praktisch sind die Abweichungen nicht groß, da alle Metallwerke einen möglichst hochwertigen Draht herzustellen bemüht sind, der nur geringe unwesentliche Abweichungen von dem hier untersuchten Material zeigt. Eine Reihe von Versuchen mit wahllos herausgegriffenen Fabrikaten anderer Firmen bestätigte diesen Sachverhalt. Die Abweichungen betrugen bis + 5 %. Die in dieser Arbeit für die untersuchten Metalle aufgestellten Koeffizienten. Exponenten und Nomogramme gelten also praktisch allgemein.

VI. Versuche am vertikal ausgespannten Drahte und an der Drahtspirale.

1. Der vertikal ausgespannte Draht.

Die Hauptversuche dieser Arbeit wurden am horizontal ausgespannten Drahte ausgeführt. Um festzustellen, ob die Art der Einspannung von wesentlichem Einfluß auf die Beharrungstemperatur des Versuchsdrahtes bei gleichem Belastungsstrom ist, wurde für das Versuchsmaterial Nickelin eine Versuchsreihe mit vertikal ausgespannten Drähten ausgeführt. Während beim horizontal ausgespannten Drahte der Einfluß der durch die Erwärmung des Drahtes entstehenden Luftströmungen (Konvektion) über die ganze Länge des Drahtes annähernd gleichmäßig verteilt ist, ist das beim vertikal ausgespannten Drahte nicht der Fall. Hier steigt die erwärmte Luft an dem Versuchsdrahte hoch und hüllt denselben in einen Zylinder heißer Luft ein. Deshalb ist zu erwarten, daß der Versuchsdraht gegen sein oberes Ende eine höhere Temperatur annimmt, als in seinem unteren Teil. Die Versuche zeigten aber, daß dieser Temperaturunterschied im Bereiche der, in dieser Arbeit untersuchten Drahtdurchmesser (0.5—3,0 mm) sehr klein ist. Die Drahtlänge betrug bei allen Versuchen $l = 1{,}30$ m. Der Draht war sorgfältig

gegen Luftströmungen durch einen Papierzylinder mit dem Durchmesser d = 1,50 m abgeschirmt und es wurde besonders darauf geachtet, daß der Versuchsdraht genau senkrecht eingespannt war (Kontrolle durch ein Lot). Die Temperatur des Drahtes wurde am unteren Ende, in der Mitte und am oberen Ende mittels Silber-Konstantan-Thermoelementen in der auf S. 21 geschilderten Art gemessen. Außerdem war ein Thermoelement verschiebbar angeordnet, um die heißeste Stelle zu finden. Dieselbe war bei allen Versuchen ungefähr 25 cm unterhalb des oberen Endes des Drahtes. Genau genommen müßte die heißeste Stelle ganz am oberen Drahtende liegen. Das ist hier nicht der Fall, weil der abkühlende Einfluß der Einspannungsklemmen sich bis zu einer Entfernung von 25 cm drahteinwärts geltend macht. Der Unterschied zwischen der tiefsten Temperatur (gemessen 25 cm drahteinwärts vom unteren Ende, um den Einfluß der Einspannung nach Möglichkeit auszuschließen!) und der höchsten Temperatur des Drahtes schwankte mit der mittleren Drahttemperatur und betrug bei 700° C, 10° C. Über 800° C wurden diese Versuche nicht ausgedehnt, da dann der Einfluß der Oxydation zu stark hervortritt. (Siehe Abschnitt VIII S. 81.)

Die am unteren Ende gemessene tiefste Beharrungstemperatur des vertikal eingespannten Drahtes entspricht derjenigen, die am horizontal eingespannten Drahte gemessen wurde. Von Interesse ist die Temperatur der heißesten Stelle, die in die Abb. 23, 24, 25 eingetragen wurde.

Nun werden die abgeführten Watt/cm² W für die heißeste Stelle des Drahtes errechnet und in den folgenden Tabellen mit den Werten für den horizontal ausgespannten Draht verglichen:

Watt/cm² W des vertikal ausgespannten Drahtes, berechnet für Nickelin, l = 1,3 m.

a) d = 0,600 mm.

t ° Celsius	ϱ	I in Amp.	Watt/cm² vertikal	Watt/cm² horizontal
100	0,5381	1,92	0,372	0,372
200	0,5400	3,20	1,040	1,071
300	0,5411	4,34	1,916	2,002
400	0,5415	5,40	2,970	3,08
500	0,5420	6,38	4,15	4,28
600	0,5422	7,28	5,40	5,57
700	0,5425	8,24	6,92	7,20
800	0,5430	9,50	9,21	9,72

b) d = 0,986 mm.

t °Celsius	ϱ	I in Amp.	Watt/cm² vertikal	Watt/cm² horizontal
100	0,5381	3,56	0,2911	0,2911
200	0,5400	5,85	0,781	0,796
300	0,5411	7,90	1,428	1,470
400	0,5415	9,85	2,22	2,325
500	0,5420	11,62	3,90	3,30
600	0,5422	13,32	4,07	4,33
700	0,5425	15,05	5,00	5,56
800	0,5430	17,60	7,12	7,94

c) d = 2,100 mm.

t °Celsius	ϱ	I in Amp.	Watt/cm² vertikal	Watt/cm² horizontal
100	0,5381	9,61	0,2153	0,2153
200	0,5400	15,63	0,5770	0,6050
300	0,5411	20,09	1,032	1,076
400	0,5415	26 8	1,700	1,672
500	0,5420	31,2	2,306	2,440
600	0,5422	36,6	3,175	3,306
700	0,5425	42,6	4 31	4,615
800	0,5430	50,8	6,14	6,44

d) d = 2,524 mm.

t °Celsius	ϱ	I in Amp.	Watt/cm² vertikal	Watt/cm² horizontal
100	0,5381	11,8	0,189	0,189
200	0,5400	19,6	0,522	0,537
300	0,5411	26.2	0,936	0,970
400	0,5415	32,1	1,405	1,477
500	0,5420	38,4	2,01	2,09
600	0,5422	44,6	2,72	2,82
700	0,5425	51,4	3,65	3,77
800	0,5430	60,8	5,06	5,37

Aus diesen Tabellen geht hervor, daß die Unterschiede zwischen den abgegebenen Watt/cm² W des vertikal und des horizontal ausgespannten Drahtes klein sind. Deshalb wurde im Interesse der Übersichtlichkeit die Eintragung dieser Versuchswerte in Abb. 38 unterlassen. Die Werte gelten für den Bereich der heißesten Drahtstelle. In Richtung gegen das untere Ende des Drahtes nehmen die abgegebenen Watt/cm² W wegen der besseren Abkühlungsbedingungen immer mehr zu und nähern sich den Werten für den horizontal ausgespannten Draht.

2. Die Drahtspirale.

Um die Ventilationsverhältnisse an Drahtspiralen mit denen des frei ausgespannten Drahtes vergleichen zu können, wurden für die in dieser Arbeit untersuchten Durchmesser d = 0,600 mm, 0,981 mm, 2,100 mm, 2,524 mm des Materials Nickelin Spiralen mit den Abmessungen der Abb. 59 untersucht. Die Länge der Spiralen schwankte um 80 cm.

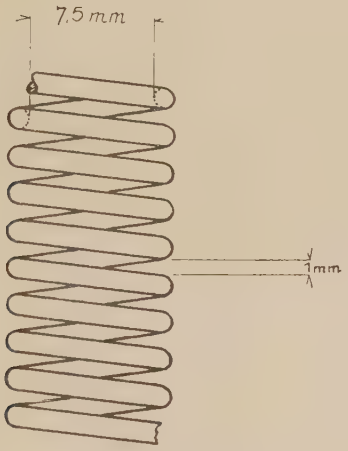


Abb. 59

Die Spiralen wurden beim Versuch genau senkrecht aufgehängt, was wohl auch in der Praxis am häufigsten der Fall sein dürfte (Kontrolle durch ein Lot). Von Versuchen mit horizontaler Aufhängung wurde abgesehen, da sich die Spirale unter ihrer Eigenlast durchbiegt und dadurch der Abstand der einzelnen Windungen ungleich wird.

Der Einfluß der aufsteigenden warmen Luftmassen machte sich erwartungsgemäß hier deutlicher bemerkbar wie beim vertikal ausgespannten Drahte. Die heißesten Windungen umfaßten ein Gebiet, das zwischen 3/5 und 4/5 aller Drahtwindungen, vom unteren Ende an gezählt, lag. Der Temperaturunterschied zwischen diesen heißesten Windungen und den Windungen tiefster Temperatur am unteren Ende der Spirale schwankte bei einer höchsten Drahttemperatur von 700° C bei allen Versuchen zwischen 106° C und 112 C. Die Belastungsströme sind bei der gleichen Beharrungstemperatur bei der Drahtspirale bedeutend kleiner als beim frei ausgespannten Drahte, was auf

die wesentlich ungünstigeren Abkühlungsbedingungen zurückzuführen ist. Diese Verhältnisse sind gut aus den Abb. 23, 24, 25 zu erkennen.

Im folgenden werden die von der Spirale (Abb. 59) abgeführten Watt/cm² W für die Windungen höchster Temperatur errechnet und mit den Werten für den horizontal ausgespannten Draht verglichen.

Watt/cm² W der Drahtspirale für Nickelin. Abb. 38.

Innendurchmesser der Spirale = 7,5 mm. l ∼ 0,8 m

a) d = 0,600 mm.

t ° Celsius	ϱ	I in Amp.	Watt/cm² vertikal	Watt/cm² horizontal
100	0,5381	1,15	0,134	0,372
200	0,5400	1,78	0,322	1,071
300	0,5411	2,36	0,566	2,007
400	0,5415	2,98	0,902	3,08
500	0,5420	3,66	1,328	4,28
600	0,5422	4,43	2,000	5,57
700	0,5425	5,32	2,83	7,20
800	0,5430	6,47	4,27	9,72

b) d = 0,986 mm.

t ° Celsius	ϱ	I in Amp.	Watt/cm² vertikal	Watt/cm² horizontal
100	0,5381	2,25	0,1124	0,2911
200	0,5400	3,49	0,275	0,796
300	0,5411	4,71	0,500	1,470
400	0,5415	5,91	0,790	2,325
500	0,5420	7,25	1,19	3,30
600	0,5422	8,77	1,74	4,34
700	0,5425	10,51	2,51	5,56

c) d = 2,100 mm.

t ° Celsius	ϱ	I in Amp.	Watt/cm² vertikal	Watt/cm² horizontal
100	0,5381	6,25	0,0926	0,2153
200	0,5400	9,8	0,227	0,605
300	0,5411	13,2	0,412	1,076
400	0,5415	16,4	0,637	1,672
500	0,5420	20,2	0,987	2,440
600	0,5422	25,8	1,58	3,306
700	0,5425	30,6	2,23	4,615

d) d = 2,524 mm.

t °Celsius	ϱ	I in Amp.	Watt/cm² vertikal	Watt/cm² horizontal
100	0,5381	7,6	0,0785	0,189
200	0,5400	12,0	0,1963	0,537
300	0,5411	16,4	0,367	0,970
400	0,5415	20,6	0,580	1,477
500	0,5420	25,6	0,895	2,09
600	0,5422	31,2	1,328	2,82
700	0,5425	37,8	1,952	3,77

Diese Werte sind in Abb. 38 zusammen mit den Ergebnissen am horizontal ausgespannten Drahte aufgetragen, um einen Vergleich der beiden Messungen zu ermöglichen. Die von der Drahtspirale abgeführte Wärmeenergie ist im Durchschnitt dreimal kleiner als die eines frei ausgespannten Drahtes gleichen Durchmessers. Dieses Ergebnis ist bedingt durch die schlechten Abkühlungsverhältnisse, die ihre Ursache in dem engen Nebeneinander der einzelnen Windungen der Spirale haben.

VII. Ältere Arbeiten.

In der E. T. Z. 1925 S. 995 wird von Paul Hennig in einem „Beitrag zur Ermittlung der Belastbarkeit von Widerständen in Abhängigkeit von der Zeitdauer der Belastung und von der Temperatursteigerung" folgende Gleichung aufgestellt:

$$I = 100 \cdot d^2 \cdot \pi \sqrt{\frac{w \cdot t}{3{,}808 \cdot \varrho \cdot v \cdot z} + \frac{k \cdot t}{0{,}952 \cdot \varrho \cdot d}} \qquad (11)$$

Darin bedeutet:

ϱ = Spezifischer Widerstand,
w = spezifische Wärme,
v = spezifisches Volumen,
I = Stromstärke in Amp.,
t = Beharrungstemperatur,
z = Belastungszeit in Sekunden,
k = die durch Abkühlung pro cm² Oberfläche und Grad Celsius Übertemperatur in der Sekunde abgeführte Wärmemenge in gcal.

Diese Gleichung wurde, soviel aus der angeführten Arbeit von Hennig zu ersehen ist, nicht auf dem Wege über Versuche, sondern durch Rechnung und Überlegung aufgestellt. Wie Kontrollversuche zeigten, hat diese Gleichung nur als Näherungsformel Berechtigung.

In der E. T. Z. 1924 S. 495 stellt Stäblein in einer Abhandlung über den „Zusammenhang zwischen Belastungsstromstärke und Temperatur" folgende Gleichung auf:

$$I = \sqrt{\frac{q \cdot (a_t + u \cdot b_t)}{\varrho}} \qquad (12)$$

Darin bedeutet:

I = Stromstärke in Amp.,
q = Querschnitt des Drahtes in mm²,
u = Umfang des Drahtes in mm,
ϱ = spezifischer Widerstand bei der Temperatur t,
a_t, b_t = Koeffizienten.

Nach Angaben von Stäblein ist die Gleichung (12) aus Versuchen hervorgegangen. Über die Art der Herleitung dieser Gleichung macht der Verfasser keine Angaben. Für die Koeffizienten a_t und b_t, die von der Temperatur unabhängig sind, stellt Stäblein folgende Tabelle auf, die für alle Metalle gelten soll:

t ° Celsius	a_t	b_t
100	5	1,4
200	10	3,7
300	16	8,0
400	24	14,5
500	35	24
600	48	38
700	63	58
800	80	86
900	100	117
1000	123	158
1100	150	208
1200	181	268
1300	217	339

Die Gleichung wurde an Aluminium, Kupfer, Nickelin und Zinn mit den Werten dieser Arbeit verglichen und die nach Stäblein errechneten Werte durch ein + auf den Abbildungen für die Erwärmungskurven kenntlich gemacht. (Siehe Abb. 16, 17, 21, 25, 31.)

Das Ergebnis dieser Kontrollrechnung zeigt, daß die Gleichung nach Stäblein im allgemeinen gute Annäherungswerte bis 300 C liefert und in dem besonderen Falle des Nickelins bis 500 C verhältnismäßig gute Übereinstimmung mit den Werten dieser Arbeit zeigt. Über diesen Temperaturen gibt die Stäbleinsche Gleichung allgemein zu große Stromwerte für eine bestimmte Beharrungs-

temperatur. Deshalb sind ihre Angaben in diesem Gebiete lediglich Annäherungswerte. Gleichung (12) gilt nach Angaben von Stäblein nicht nur für Runddraht, sondern auch für Banddraht.

Außerdem wurden eine Reihe von Kontrollversuchen unter Benutzung des Chromnickel-Materials Marke „Cekas" der Firma C. Kuhbier & Sohn, Dahlerbrück i. W., unternommen, und zwar für die Durchmesser d = 1,0 mm, 2,0 mm und 3,0 mm. Die Versuche zeigten Abweichungen bis zu ± 5% zwischen den Ergebnissen der Messung und Rechnung nach der von Stäblein aufgestellten Formel. Im Rahmen dieser Fehlergrenze ist eine Übereinstimmung bis gegen 900° C vorhanden, während im Falle des in dieser Arbeit untersuchten Nickelin dieselbe bereits über 500° C aufhört. Es ist deshalb anzunehmen, daß Stäblein bei der Aufstellung seiner Beziehung in erster Linie die Erwärmungstabellen des „Cekas"-Materials zur Verfügung gestanden haben, was auch durch die in seiner Arbeit angeführten Beispiele wahrscheinlich wird.

VIII. Einfluß der Oxydation.

Der Einfluß der Oxydation auf die Watt/cm² W besteht im wesentlichen aus folgenden Komponenten:

a) Vergrößerung des Widerstandes R durch Verkleinerung des leitenden Querschnittes.
b) Vergrößerung des Durchmessers (und damit der Oberfläche) durch Aufschichtung des Oxydes.
c) Änderung der Oberflächen-Beschaffenheit und dadurch Änderung der
   a) Wärmeleitung und Konvektion,
   b) Wärmestrahlung.

Die Hauptpunkte, nach denen diese Versuche vorgenommen wurden, waren folgende:

a) Einfluß der Oxydation auf die Temperaturmessung.
b) Änderung des Temperatur - Strom - Zusammenhanges durch die Oxydation.
c) Die Temperaturerhöhung an den Fehlerstellen. (Siehe S. 85.)
d) Die Watt/cm² W in Abhängigkeit von der Zeit bei konstanter Temperatur des Versuchsdrahtes.
e) Widerstandsänderungen durch die Oxydation.

Diese Versuche wollen keine erschöpfende Abhandlung dieser schwierigen und schwer faßbaren Frage, sondern lediglich eine, im Rahmen dieser Arbeit notwendige Ergänzung zur Beurteilung der früheren Messungen sein.

1. Kupfer.

Entsprechend der Bedeutung des Kupfers als eines der wichtigsten Metalle der Elektrotechnik wurden die Oxydations-Verhältnisse dieses Metalles besonders eingehend untersucht.

Um festzustellen, welchen Einfluß die Oxydationszeit, die zwischen je zwei Ablesungen vergeht, auf die Werte der Messungen hat, wurde ein Kupferdraht mit dem Durchmesser d = 2,000 mm (kalt gemessen) 15 Minuten bei t = 940° C (I = 160 Amp.) geglüht. Der Widerstand dieses Drahtes hatte sich im Laufe dieser Zeit meßbar nicht verändert. Nun wurde ein neuer Draht vom gleichen Durchmesser d = 2,000 mm 15 Minuten bei t = 980° C (I = 170 Amp.) geglüht, gleichfalls ohne daß Widerstands-Änderungen in dieser Zeit festgestellt wurden. Erst als der Drahteinsatz mit einem Strom I = 180 Amp. (t = 1020° C) belastet wurde, trat eine meßbare Widerstandsänderung auf. Sie betrug nach 15 Minuten 20 %. Das Wesentliche dieses Versuches ist, daß eine meßbare Widerstandsänderung im Zeitraum von 15 Minuten erst wenig unter dem Schmelzpunkt des Metalles einsetzt.

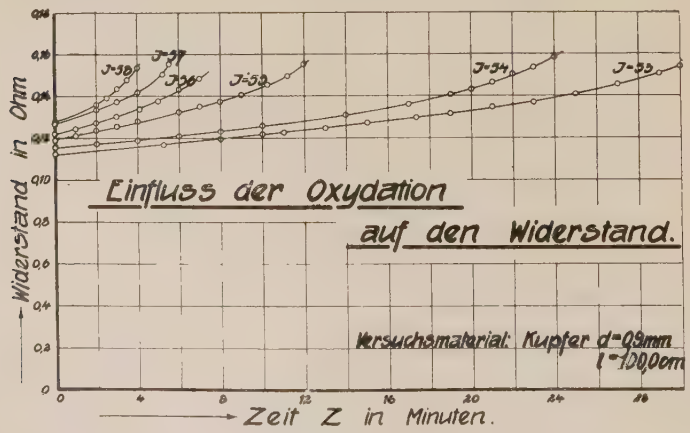


Abb. 60

Den gleichen Sachverhalt bestätigt Abb. 60, auf der in Abhängigkeit von der Zeit Z die Widerstandsänderung eines Kupferdrahtes mit dem Durchmesser d = 0,9 mm, l = 1,00 m bei konstantem Belastungsstrom (I = constans = 58, 57, 56, 55, 54, 53 Amp.) aufgetragen ist. Eine Messung der Temperatur des Versuchsdrahtes wurde nur zu Beginn des Versuches vorgenommen, da bei konstantem Belastungsstrom und wachsendem R die Watt/cm² W

und damit die Temperatur t des Drahtes dauernd bis zum Schmelzpunkt steigen. Aus Abb. 60 geht hervor, daß bei Kupfer bei Temperaturen, die kleiner als 800° C sind, der Einfluß der Vergrößerung des Widerstandes durch Verkleinerung des leitenden Querschnittes infolge der Oxydation, nur wenige Prozent des Widerstandes beträgt.

Der Temperatur-Strom-Zusammenhang eines Kupferdrahtes mit dem Durchmesser d = 1,00 mm wurde bis 1000° C aufgenommen und diese Temperatur 5 Minuten konstant gehalten, hierauf wurde der Belastungsstrom abgeschaltet und der Draht der Abkühlung durch die umgebende Luft überlassen. Nachdem der Versuchsdraht vollständig ausgekühlt war, wurde er wieder erwärmt und der Temperatur-Strom-Zusammenhang abermals bestimmt. Wie aus der folgenden Tabelle und Abb. 61 hervorgeht, zeigt es sich, daß die Erwärmungskurve des geglühten oxydierten Drahtes bei gleichem Belastungsstrom I durchschnittlich 20° C niedriger liegt als bei dem ersten Versuche. Diese Temperaturerniedrigung bei gleichem Strom ist allein auf die Änderung in Farbe und Struktur der Oberfläche des Versuchsdrahtes zurückzuführen.

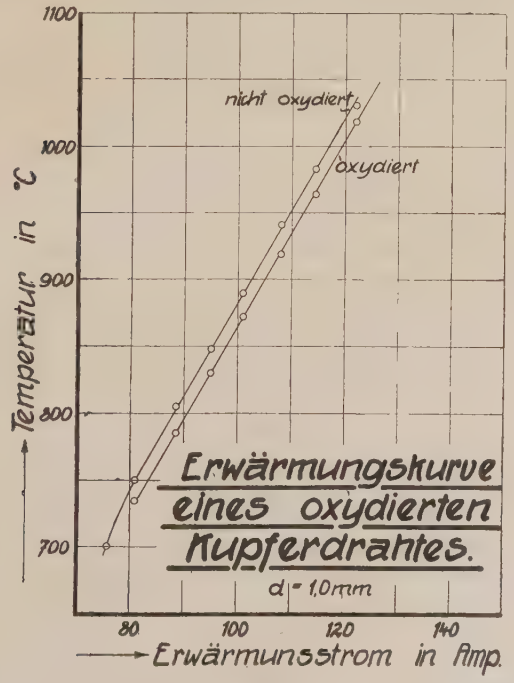


Abb. 61

I in Amp.	t_1 Temperatur des wenig oxydierten Drahtes	t_2 Temperatur des stark oxydierten Drahtes (5 Minuten bei 1000° C geglüht)
76,0	700	—
81,0	750	734
88,5	805	785
95,0	845	830
101,0	890	872
108,0	941	919
114,5	983	946
122,0	1000	1018

Um den Einfluß der Oxydation unter 1000° C bei dauernder Einwirkung festzustellen, wurde ein Kupferdraht mit dem Durchmesser d = 1,257 mm auf 985° C erwärmt und diese Temperatur konstant gehalten. Nach ungefähr 20 Minuten beginnen sich an dem Versuchsdrahte einige hellere Stellen zu bilden, die dadurch hervorgerufen werden, daß infolge einer geringen Ungleichheit im Gefüge des Materials an dieser Stelle eine Widerstandserhöhung und damit eine Vergrößerung des $I^2 \cdot R$ auftritt, wodurch die Temperatur an dieser Stelle gegenüber der Nachbarschaft steigt. Die anfänglich geringe Temperaturerhöhung (nach ungefähr 20 Minuten bei einem Draht mit dem Durchmesser d = 1,257 mm 12° C) steigt, trotzdem der übrige Teil des Drahtes auf konstanter Temperatur gehalten wird, immer mehr an, bis der Draht an einer dieser Stellen schmilzt. Während an den sich normal verhaltenden Stellen des Drahtes zur Erhaltung der konstanten Temperatur t = 895° C der Belastungsstrom vergrößert werden muß, ist es bei den erwähnten Fehlerstellen umgekehrt.

In Abb. 62 ist das charakteristische Verhalten eines derartigen Temperaturgipfels dargestellt. Die Erwärmung des 1,00 mm starken Kupferdrahtes erfolgte gemäß dem in die Abbildung eingetragenen Pfeil. Bei 1010° C wurde die Temperatur des Versuchsdrahtes 20 Minuten konstant gehalten und dann die Temperatur-Stromkurve abwärts aufgenommen. Um an dieser Fehlerstelle die Temperatur konstant auf 1010° C zu halten, war es notwendig, den Belastungsstrom I zu verkleinern. Dadurch sank die Temperatur des übrigen, sich normal verhaltenden Teiles des Drahtes, der nach dem eben Dargelegten bei Konstanthaltung seiner Temperatur nach einer Stromsteigerung verlangte. Nachdem die Temperatur dieser Fehlerstelle 20 Minuten konstant auf 1010° C gehalten worden war,

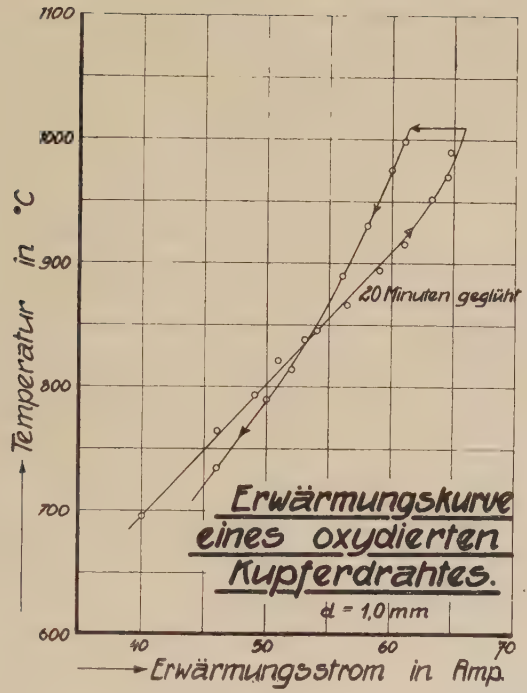


Abb. 62

wurde die Temperatur-Stromkurve abwärts aufgenommen (Abb. 62). Es zeigte sich, daß über 844° C die Belastungsströme für die Temperaturen der Abkühlungskurve kleiner sind als für die der Erwärmungskurve, während unter 844° C das Umgekehrte der Fall ist. Die Ursache dieses Verhaltens ist in der Wechselwirkung der Oxydation und der Widerstandserhöhung an dieser Fehlerstelle begründet. Oberhalb 844° C überwiegt der Einfluß der Widerstandserhöhung, unterhalb 844° C der Einfluß der Oberflächenveränderung durch die Oxydation. Der Widerstand R steigt so stark an, daß, trotzdem I kleiner wird, die Watt/cm² Oberfläche beim oxydierten Drahte größer werden. Unterhalb 844° C ist zwar R auch größer als bei dem wenig oxydierten Versuchsdrahte, aber durch die andere Beschaffenheit der Oberfläche ist der Draht in der Lage, pro cm² mehr Watt abzuführen als in nichtoxydiertem Zustande. Infolgedessen sinkt trotz gesteigertem I die Temperatur t.

Diese Betrachtung gilt nur als Erklärung für die an den Fehlerstellen auftretende Besonderheit der Temperatur-

erhöhung bei konstantem Belastungsstrom. Das Auftreten von derartigen Temperaturspitzen nach längerem Glühen wurde bei allen Metallen beobachtet. Am zahlreichsten traten dieselben bei Eisen auf.

Bei Betrachtung der Abb. 62 liegt die Vermutung nahe, daß für diese Fehlerstellen der Belastungsstrom I und der Widerstand R sich so ändern, daß für eine bestimmte Temperatur t das $I^2 \cdot R$ = constans ist. Wenn also R größer würde, müßte I kleiner werden, was für diese eine Fehlerstelle zutrifft, während für den übrigen Teil des Drahtes nach Abb. 61 bei lang anhaltendem Glühen sowohl I als auch R und damit $I^2 \cdot R$ bei konstanter Temperatur größer werden. Diese Erscheinung gilt allgemein und hängt damit zusammen, daß durch die fortschreitende Oxydation der Versuchsdraht infolge der Veränderung seiner Oberfläche bei konstanter Temperatur immer mehr Watt/cm² W abzugeben imstande ist.

Um die Veränderung der Watt/cm² W bei konstanter Temperatur in Abhängigkeit von der Zeit festzustellen, wurde ein Kupferdraht mit dem Durchmesser d = 1,257 mm und der Länge l = 103,05 cm auf 895° C erwärmt und diese Temperatur konstant gehalten.

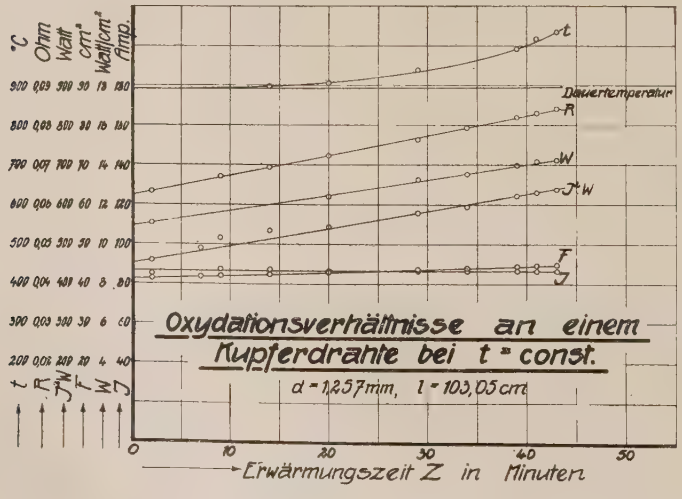


Abb. 63

Die folgende Tabelle und Abb. 63 geben eine Übersicht über die Ergebnisse dieses Versuches. In der ersten Rubrik gibt Z die Minuten an, die nach dem Einschalten des Belastungsstromes I (2. Rubrik) verflossen sind. Die 3. Rubrik gibt die Temperatur t der heißesten Stelle und

die nächste Rubrik den Widerstand R des Drahtes an. Die Oberfläche wurde durch Durchmesser-Längenmessung zu Beginn und nach Beendigung des Versuches bestimmt. Da die Oxydation den Draht nicht an allen Stellen der Ober-

Mittlere Watt/cm² W' und Oxydation von Kupfer.

t = 895° C (Dauertemperatur).
d = 1,257 mm.
l = 103,05 cm.

Zeit Z in Minuten	Belastgs.-Strom I	Temperatur Spitze in °C	Widerstand R in Ohm	$I^2 \cdot R$ in Watt	Oberfläche F in cm²	Mittlere Watt/cm² W'
0					41,3	
2	85,0	895	0,0635	459	41,46	11,09
7	87,0	895	0,0655	490	41,87	11,7
9	87,8	895	0,0672	517	42,03	12,3
14	87,8	900	0,0695	535	42,44	12,6
20	87,0	907	0,0723	543	42,93	12,4
29	87,0	940	0,0764	578	43,66	13,25
34	87,0	978	0,0793	594	44,06	13,47
39	87,0	995	0,0822	622	44,47	13,98
41	87,0	1018	0,0832	632	44,63	14,18
43	87,0	1033	0,0842	638	44,80	14,22

fläche gleichmäßig verändert (Wülste, Risse), läßt sich die Oberfläche des oxydierten Drahtes nur angenähert berechnen. Nach 43 Minuten war der im kalten Zustande gemessene Durchmesser des Drahtes von d = 1,257 mm auf d = 1,362 mm gestiegen, die Oberfläche also von 41,3 cm² auf 44,8 cm². Mit Rücksicht auf die, mit der Länge des Versuches immer größer werdenden Temperaturgegensätze längs des Drahtes sind die Watt/cm² W längs eines stark oxydierten Drahtes nicht mehr konstant. Um Vergleiche vornehmen zu können, wurden deshalb in der letzten Rubrik der vorstehenden Tabelle die über die ganze Länge des Versuchsdrahtes mittleren Watt/cm² W' angegeben.

Das Ergebnis dieses Versuches zeigt, daß die mittleren Watt/cm² W' mit der Belastungszeit infolge der Oxydationsveränderungen der Drahtoberfläche steigen. Weiter zeigt sich, daß sich die Temperatur des größten Teiles des Drahtes t = 895° C durch den Strom I = 87 Amp. konstant halten ließ. Für diese Stelle würde also gelten, daß die Steigerung der Watt/cm² W' ungefähr gleich ist dem Betrag, der durch die, sich in ihrer Beschaffenheit ändernde Oberfläche mehr ausgestrahlt wird.

Nach Beendigung des Versuches wurde das Oxyd von dem Versuchsdrahte mit einem Stück Holz vorsichtig abgekratzt und der Durchmesser des metallischen Kernes gemessen. Er betrug d = 1,09 mm. Da der Draht im oxydierten Zustande einen Durchmesser d = 1,362 mm (kalt gemessen) hatte, betrug die Stärke der Oxydschicht 0,136 mm.

Errechnet man für den Durchmesser des metallischen Kernes des Drahtes den Widerstand R, so findet man:

$$\frac{d_1^2}{d_2^2} \cdot R_{895} = R_2 = \frac{1{,}257^2 \cdot 0{,}0635}{1{,}09^2} = 0{,}0844 \text{ Ohm}$$

Es bedeutet:

d_1 = Durchmesser in mm zu Beginn des Versuches.

d_2 = Der vom Oxyd befreite Durchmesser in mm nach Beendigung des Versuches.

R_{895} = Widerstand des Versuchsdrahtes zu Beginn des Versuches in Ohm.

R_2 = Widerstand des vom Oxyd befreiten metallischen Kernes des Versuchsdrahtes in Ohm.

Vergleicht man diesen Wert (0,0844 Ohm) mit dem Meßwert in der Tabelle S. 87 R = 0,0842 Ohm, so erkennt man, daß die Übereinstimmung eine fast vollkommene ist. Daher ist die Annahme berechtigt, daß die Vergrößerung des Widerstandes bei glühenden oxydierten Drähten im wesentlichen nur in einer Verkleinerung des leitenden Querschnittes durch die Oxydation ihre Ursache hat. Die obige Berechnungsweise ist nur dann angängig, wenn die Oxydation den Durchmesser des Drahtes auf der ganzen Länge annähernd gleich verkleinert hat.

Um festzustellen, ob sich Drähte gleichen Durchmessers bei gleicher Dauer-Temperatur und gleichem Belastungsstrom ähnlich verhalten, wurden 5 Kupferdrähte mit dem Durchmesser d = 1,257 mm geglüht. Von diesen 5 Versuchsdrähten schmolzen 4 genau wie der Draht des oben beschriebenen Versuches 43 Minuten und nur ein Draht 44 Minuten nach dem Einschalten des Stromes durch. Die mittleren Watt/cm² W' waren mit geringen Abweichungen in Abhängigkeit von der Glühzeit die gleichen wie bei dem oben beschriebenen Versuch. Bei allen Versuchsdrähten begannen sich bei der Dauertemperatur t = 895° C nach ungefähr 10 Minuten Stellen erhöhter Temperatur zu bilden. Daraus ist zu schließen, daß die unregelmäßige Temperaturverteilung längs eines längere Zeit

glühenden Kupferdrahtes und die damit steigenden, mittleren Watt/cm² W' Eigenschaften sind, die allen oxydierenden Metallen zukommen und daß diese Versuche keinen Sonderfall darstellen.

Nun wurde untersucht, wie sich ein Kupferdraht gleichen Durchmessers bei niedrigerer Dauertemperatur und damit längerer Oxydationszeit Z verhält. Ein Draht mit dem Durchmesser d = 1,257 mm wurde bei t = 850° C geglüht. Erst nach 25 Minuten waren geringe Temperaturunterschiede längs des Drahtes zu beobachten, die sich immer mehr vergrößerten, bis nach 112 Minuten der Versuchsdraht an einer derartigen Stelle erhöhter Temperatur durchschmolz.

An den Stellen erhöhter Temperatur bilden sich nach ungefähr 70—90 Minuten Aufschichtungen und Wölbungen der Oxydationsschicht, die im glühenden Zustande mit freiem Auge gut erkennbar sind. Der kalte Durchmesser des oxydierten Drahtes schwankte nach dem Versuch zwischen d = 1,343 mm und d = 1,376 mm, je nachdem, ob an Stellen mit geringerer oder stärkerer Oxydation gemessen worden war. Nach dem Abkratzen des Oxydes hatte der Draht einen mittleren Durchmesser d = 0,954 mm. Die Stärke der Oxydschicht betrug also 0,211 mm.

2. Nickelin.

Um die Oxydationsverhältnisse an Nickelindrähten zu prüfen, wurde ein Draht mit dem Durchmesser d = 1,398 mm und der Länge l = 95,7 cm auf die Temperatur t = 970° C erwärmt und dieselbe konstant gehalten. Die Veränderungen des Widerstandes, der Oberfläche und der mittleren Watt/cm² W' während dieser Glühzeit zeigt die folgende Tabelle.

Ungefähr 20 Minuten nach Beginn des Versuches war an einigen Stellen der Oberfläche des Drahtes eine Temperaturerhöhung von 24° C vorhanden. Die Temperaturverhältnisse werden also ebenso wie bei Eisen und Kupfer auch hier bei längerem Glühen ungleichmäßig. Diese Erhöhung der Temperatur an einzelnen Stellen stieg im Laufe von weiteren 10 Minuten auf 60° C, bis der Draht 33 Minuten nach Beginn des Versuches an einer dieser Stellen erhöhter Temperatur schmilzt. Die Temperatur des übrigen Teiles des Versuchsdrahtes wurde konstant auf t = 970° C gehalten. Der Widerstand des Drahtes stieg im Verlaufe des Versuches nur um 13,5 %. Die mittleren Watt/cm² W' steigen in den ersten 20 Minuten des

Versuches ziemlich stark an, um nach dieser Zeit sich nur wenig zu größeren Werten zu ändern. Die Oxydationsschicht scheint eine weitere, starke Oxydation zu verhindern. Der kalt gemessene Durchmesser des Drahtes war zu Beginn des Versuches d = 1,398 mm und nach Beendigung desselben d = 1,583 mm. Wurde das Oxyd abgekratzt, so hatte der metallische Kern des Drahtes einen

Mittlere Watt/cm² W' und Oxydation von Nickelin.

t = 970° C (Dauertemperatur).
d = 1,398 mm.
l = 95,7 cm.

Zeit Z in Minuten	Belastgs.-Strom I	Temperatur Spitze in°C	Widerstand R in Ohm	$I^2 \cdot R$ in Watt	Oberfläche F in cm²	Mittlere Watt/cm² W
0	44,7	970	0,318	635	42,7	14,85
8	45,0	970	0,3245	657	44,08	14,90
17	46,6	970	0,331	718	45,64	15,75
20	47,2	994	0,338	755	46,15	16,35
24,5	47,4	1008	0,344	771	46,93	16,42
26	47,2	1010	0,348	780	47,20	16,55
31	48,9	1030	0,361	845	48,05	17,58
33		geschmolzen			48,41	

Durchmesser von d = 1,268 mm. Die Stärke der Oxydschicht betrug demnach 0,157 mm. Bei Abkühlung des Drahtes durch Abschalten des Belastungsstromes platzt das grauschwarze Oxyd mit knisterndem Geräusch in langen Streifen ab, die zum Teil an dem erkalteten Drahte hängen bleiben.

Bei einem anderen Versuchsdrahte gleichen Durchmessers (d = 1,398 mm), der auf die gleiche Dauertemperatur t = 970° C erwärmt wurde, war der Durchmesser des kalten Drahtes nach 25 Minuten langer Belastungszeit auf d = 1,561 mm gestiegen. Der Durchmesser des metallischen Kernes betrug d = 1,272 mm. Die Stärke der Oxydschicht war demnach 0,144 mm.

Wie diese Versuche zeigen, ist Nickelin zu Dauerversuchen bei Temperaturen um 1000° C nicht geeignet. Unter 800° C ist es für Glühzeiten bis zu mehreren Stunden brauchbar. Es bildet sich dann eine Oxydschicht, die das weitere Fortschreiten der Oxydation verhindert und dem Drahte dadurch Dauerhaftigkeit verleiht.

3. Reinnickel.

Um die Oxydationsverhältnisse an Reinnickel zu untersuchen, wurde ein Draht von der Länge l = 94,8 cm mit dem Durchmesser d = 1,510 mm bei der Temperatur t = 1040° C 93 Minuten geglüht. Die Veränderungen der Oberfläche, des Widerstandes und der mittleren Watt/cm² W' sind aus der folgenden Tabelle zu ersehen.

Der Versuch ergab, daß Reinnickel bei der Versuchstemperatur der Oxydation außerordentlich großen Widerstand entgegensetzt. Lediglich zu Beginn der Glühzeit, wo die Oberfläche noch ihre größte Aktivität besitzt, ist sowohl aus der Zunahme des Belastungsstromes als auch des Widerstandes und der Oberfläche der Einfluß der wachsenden Oxydation zu ersehen. Nach den ersten 20 Minuten sind die Verhältnisse vollkommen stabil geworden und die Oxydschicht scheint ein weiteres Vordringen der Oxydation zu verhindern. Von nun ab zeigen alle Versuchswerte nur geringe Änderungen, die durch Ungenauigkeiten der Messung (Netzschwankungen!) zu erklären sind.

Mittlere Watt/cm² W' und Oxydation von Reinnickel.

t = 1040° C (Dauertemperatur)
d = 1,510 mm.
l = 94,8 cm.

Zeit Z in Minuten	Belastungsstrom I	Widerstand R in Ohm	$I^2 \cdot R$ in Watt	Oberfläche F in cm²	Mittlere Watt/cm² W'
0	52,0	0,263	710	45,70	15,50
10	52,6	0,264	730	45,76	15,95
13	54,0	0,268	781	45,78	17,05
17	54,4	0,268	793	45,81	17,30
20	55,2	0,269	820	45,83	17,88
30	55,2	0,272	828	45,89	18,05
63	55,2	0,273	831	46,11	18,02
78	55,3	0,273	835	46,20	18,09
84	55,2	0,273	831	46,24	18,00
93	55,2	0,273	831	46,30	17,96

Die Temperaturverteilung war während der ganzen Glühzeit vollkommen gleichmäßig. Temperaturspitzen, wie sie bei Kupfer, Nickelin und Eisen auftraten, waren nicht vorhanden. Nach 93 Minuten langem Glühen war der kalt gemessene Durchmesser des Versuchsdrahtes von d = 1,510 mm auf d = 1,531 mm gestiegen. Der vom Oxyd befreite Durchmesser des Drahtes war d = 1,490 mm. Die Stärke der Oxydschicht betrug deshalb nur 0,020 mm, was im Vergleich zu Kupfer und Eisen außerordentlich wenig

ist. Das Oxyd ist grauschwarz und springt bei plötzlicher Abkühlung (durch Abschalten des Belastungsstromes) fast auf der ganzen Länge des Drahtes ab.

Wurde der Versuchsdraht nach dieser langen Glühzeit (93 Minuten) durch Abschalten des Stromes abgekühlt und nach 10 Minuten wieder erwärmt, so zeigte sich eine geringe Steigerung der abgegebenen Watt/cm², die durch die Verkleinerung des Durchmessers zu erklären ist. Ferner wurde derselbe Versuchsdraht fünfmal abwechselnd 10 Minuten erwärmt und dann abgekühlt, wobei außer der bereits erwähnten Steigerung der Watt/cm² beobachtet wurde, daß das Oxyd bei Abkühlung des Drahtes anfangs nur noch teilweise, späterhin nicht mehr von dem metallischen Kern des Drahtes absprang. Von nun ab sind die Watt/cm² annähernd konstant.

Um das Verhalten von Reinnickel bei noch höheren Temperaturen kennenzulernen, wurde ein Draht mit dem Durchmesser d = 1,510 mm auf 1220° C erwärmt und diese Temperatur konstant gehalten. Nach einer Glühzeit von 60 Minuten waren die Ergebnisse prinzipiell die gleichen wie bei dem oben beschriebenen Versuch. Die Watt/cm² waren anfangs schneller angestiegen und hatten nach ungefähr 20 Minuten einen konstanten Wert angenommen. Die weitere Oxydation des Metalles scheint also auch noch bei 1220° C durch das Oxyd verhindert oder mindestens stark in ihrer Wirkung geschwächt zu werden. Der kalt gemessene Durchmesser des Drahtes war in diesen 60 Minuten von d = 1.510 mm auf d = 1.530 mm gestiegen. Der von Oxyd befreite Durchmesser war d = 1.480 mm. Die Stärke der Oxydschicht betrug demnach 0,025 mm, ein Wert, der dem des ersten Versuches sehr nahe kommt. Die Temperaturverteilung war vollkommen gleichmäßig. Temperaturspitzen waren nicht zu beobachten.

Reinnickel erweist sich demnach als ein bei hohen Temperaturen und langen Glühzeiten sehr brauchbares Metall von großer Konstanz.

4. Eisen.

Da Eisen bereits bei gewöhnlichen Temperaturen (20° C) stärker als die meisten technischen Metalle der Oxydation unterworfen ist, war vorauszusehen, daß die Oxydation bei Glühtemperaturen heftig sein wird.

Nach 5 Minuten langem Glühen bei der Temperatur t = 905° C war der Durchmesser des Eisendrahtes von d = 1,520 mm auf d = 1,562 mm gestiegen.

Nun wurde untersucht, wie sich der Widerstand R bei konstantem Belastungsstrom I in Abhängigkeit von der Zeit ändert. Ein Eisendraht von der Länge l = 48,6 cm und dem Durchmesser d = 1,520 mm wurde durch den Strom I = 36,8 Amp. auf die Temperatur t = 1050° C erwärmt und dieser Strom konstant gehalten. Die folgende Tabelle zeigt das Ergebnis des Versuches.

Zeit Z in Minuten	Widerstand R in Ohm
0	0,383
4	0,397
6	0,409
8	0,423
9	0,434
12	0,461
13	0,476
15	0,489
16	0,493
17	0,507
18	0,515
19	0,525
20	0,535
21	0,540
22	0,549
23	0,558
24	0,575
25	0,576
27	0,592
29	durchgeschmolzen

Die Widerstandserhöhung betrug nach einer Glühzeit von 27 Minuten, bezogen auf den Widerstand bei Beginn des Versuches 54,5 %. Nach Beendigung des Versuches schwankte der Durchmesser des Drahtes von d = 2,176 bis 1,982 mm und der durch Abkratzen vom Oxyd befreite Durchmesser zwischen d = 1,072 mm bis 1,168 mm. Aus diesen Angaben ist zu ersehen, daß die Oxydation und Temperaturverhältnisse ungleichmäßig waren.

Bereits 9 Minuten nach Beginn des Versuches bildeten sich ungefähr 8 Stellen, die wesentlich höhere Temperatur hatten als der übrige Teil des Drahtes. Der Temperaturunterschied betrug 50° C. Nach weiteren 3 Minuten hatte der Versuchsdraht keine einheitliche Temperatur mehr, sondern er glühte mit einem ganzen Temperatur-Interwall. 2 Minuten später betrugen die größten Temperaturunterschiede längs des Drahtes bereits gegen 100° C. An allen Stellen höherer Temperatur wuchs der Durch-

messer merklich an, während sich im Verlauf der weiteren Glühzeit Faltungen und Wölbungen des Oxydes bildeten und damit Temperaturverhältnisse schufen, die sich dauernd änderten. Deshalb ist der Versuch zwecklos, Temperatur und Strom in diesem Temperaturbereich in einen Zusammenhang zu bringen. Es wurde daher auch davon abgesehen, die abgegebenen Watt/cm² W' bei konstanter Temperatur zu bestimmen, weil der Versuchsdraht durch den Einfluß der Oxydation keine ausgesprochene Bezugstemperatur hat.

5. Aluminium, Silber, Zinn.

An Drähten aus Zinn und Aluminium waren irgendwelche, die Versuchswerte beeinflussende Veränderungen durch die Oxydation nicht zu beobachten. Drähte aus Silber verlieren ihre Geschmeidigkeit und werden spröde und zerbrechlich, was damit zusammenhängen dürfte, daß das Metall durch das lange Erwärmen wieder in den kristallinen Zustand übergeführt wird.

6. Schlußbetrachtung über die Oxydation.

Zusammenfassend kann gesagt werden, daß die Oxydation auf die Temperaturmessung wegen der geringen Zeit, die zur Vornahme dieser Messung notwendig ist, keinen wesentlichen Einfluß hat, wenn für jede Temperaturmessung bei hohen Temperaturen ein neuer Versuchsdraht genommen wird.

Bei längeren Glühzeiten ändert sich die Temperatur bei konstantem Belastungsstrom infolge der Wechselwirkung der oxydierenden Oberfläche (vergrößerte Wärmeabgabefähigkeit) und des, mit der Oxydation steigenden Widerstandes R (Vergrößerung der zugeführten Watt/cm²).

Durch langes Glühen wurden alle in dieser Arbeit untersuchten Metalle mit Ausnahme von Reinnickel durch ungleichmäßige Oxydation und die damit verbundene Temperaturerhöhung (Auftreten von Temperaturspitzen!) zerstört.

Durch die Oxydation steigt der Widerstand des Versuchsmaterials infolge Verkleinerung des leitenden Querschnittes.

Bei konstanter Temperatur steigen die Watt/cm² infolge der Veränderungen durch die Oxydation (Steigen des Widerstandes).

C. ZUSAMMENFASSUNG.

Die Hauptergebnisse dieser Arbeit, die sich damit beschäftigt, einen Zusammenhang zwischen der Beharrungstemperatur t, dem Belastungsstrom I, den an Luft pro cm^2 Oberfläche abgeführten Watt W und dem Durchmesser d herzustellen, werden folgendermaßen zusammengefaßt:

1. Von den drei Faktoren der Wärmeabgabe an Luft, der Wärmeleitung, der Konvektion und der Wärmestrahlung, beträgt der Anteil der Wärmestrahlung bis 500° C nur wenige Prozent und nur über 1000°—1100° C mehr als 20 %.

2. Die von einem Drahte pro cm^2 Oberfläche an Luft abgegebenen Watt lassen sich durch folgende Beziehung darstellen:

$$W = C \cdot t^n \qquad (3)$$

3. Der Koeffizient C und der Exponent n werden für die Metalle Aluminium, Eisen, Kupfer, Nickelin, Reinnickel, Silber und Zinn bis nahe an den Schmelzpunkt bestimmt. (Siehe S. 59—64.)

4. Es wird festgestellt, daß sich n für alle untersuchten Metalle in den Grenzen von 1,4152 bis 1,5862 um 1,5 bewegt. (Siehe S. 49.)

5. Für jedes untersuchte Metall ist n bis 600° C bezw. 700° C konstant. (Siehe S. 59—64.)

6. Über 600° C bezw. 700° C ist n infolge der Oxydation veränderlich und läßt sich durch folgende Beziehung darstellen:

$$n = b \cdot d^s \qquad (6)$$

7. Der Koeffizient C in Gleichung (3) ist abhängig vom Durchmesser d und folgt der Gleichung:

$$C = c \cdot d^m \qquad (4,\ 4a)$$

8. Für den Belastungsstrom I wird folgende Grund-Gleichung empirisch gefunden (siehe S. 58):

$$I = \sqrt{\frac{24{,}673 \cdot C \cdot d^3 \cdot t^n}{\varrho}} \qquad (8)$$

9. Durch weitere Zerlegung des Koeffizienten C und des Exponenten n wird Gleichung (8) in folgende Form gebracht (siehe S. 59):

Gültig von 100°—600° bezw. 700° C

$$I = \sqrt{\frac{24{,}673 \cdot c_0 \cdot d^{3+m_0} \cdot t^{n_0}}{\varrho}} \qquad (10)$$

10. Es wurden die zu den unter 8. und 9. angeführten Gleichungen korrespondierenden Beziehungen (7), (9) für die Temperatur t aufgestellt, die aber untergeordneten Wert haben, weil sie den spezifischen Widerstand ϱ enthalten, der selbst eine Funktion der Temperatur ist. (Siehe S. 58, 59.)

11. Für die Metalle Aluminium, Eisen, Kupfer, Nickelin, Reinnickel, Silber und Zinn und für den Temperaturbereich 100°—700° C (für Silber bis 900° C) wurden **auf Grund der Gleichungen (8) und (10)** Nomogramme aufgestellt (Abb. 51, 52, 53, 54, 55, 56, 57, 58), die einen Zusammenhang zwischen dem Belastungsstrom I, der Beharrungstemperatur t, dem Durchmesser d und den Watt/cm² W geben. (Siehe S. 64—74.)

12. Die errechneten Gleichungen, Koeffizienten und Exponenten haben für alle in dieser Arbeit untersuchten Metalle für praktische Berechnungen allgemeine Gültigkeit.

13. Durch die Oxydation wird bei konstanter Temperatur der Widerstand des Versuchsdrahtes erhöht. Die Ursache dieser Erhöhung ist die Verminderung des leitenden Querschnittes durch Oxydbildung.

14. Die Oxydation hat auf die Temperaturmessung wegen der geringen Zeit, die zur Vornahme derselben notwendig ist, keinen wesentlichen Einfluß, sofern für jede Temperaturmessung ein neuer Versuchsdraht genommen wird.

15. Reinnickel zeigt bis zu 1220° C eine große Konstanz in seinen Eigenschaften. Sein Oxyd verhindert eine weitere, kräftige Fortsetzung der Oxydation.

16. Bei längeren Glühzeiten ändert sich die Temperatur des Versuchsdrahtes bei konstantem Belastungsstrom infolge der Wechselwirkung der oxydierenden Oberfläche und des mit der Oxydation steigenden Widerstandes.

Diese Arbeit wurde im Elektrotechnischen Institut der Technischen Hochschule Breslau ausgeführt. Es ist mir eine angenehme Pflicht, dem Direktor desselben, Herrn Professor Dr.-Ing. Georg Hilpert, für die Überlassung der Instrumente, die zur Ausführung der Versuche notwendig waren, sowie für sein stets hilfsbereites Interesse meinen aufrichtigen Dank auszusprechen.

D. VERZEICHNIS DER BENUTZTEN SYMBOLE.

a	Spannungsabfall in Millivolt.
a_t, b_t	Koeffizienten der Gleichung nach Stäblein (S. 80).

c	Koeffizient in der Gleichung $C = c \cdot d^m$.
C	Koeffizient in der Gleichung $W = C \cdot t^n$.
d	Durchmesser des Drahtes in mm.
e	Thermospannung in Millivolt.
E	Spannung in Volt.
f	Anzahl der Perioden pro Sekunde.
F	Oberfläche in cm^2.
g	Konstante des Wärmeüberganges zu den Klemmen in Watt/cm^2, °C.
G	Gewicht im g.
h	Äußere Wärmeleitfähigkeit der Drahtoberfläche in Watt/cm^2, °C.
I, i	Strom in Amp.
K	Vergrößerungsfaktor.
l	Länge des Drahtes in cm.
L	Halbe Länge des Drahtes in cm.
m	Exponent in der Gleichung $C = c \cdot d^m$.
n	Exponent in der Gleichung $W = C \cdot t^n$.
p	Innere Wärmeleitfähigkeit des Drahtmaterials in Watt/cm, °C.
q	Querschnitt des Versuchsdrahtes in mm^2.
Q	Pro Sekunde zugeführte Wärmeenergie in gcal.
R, r	Elektrischer Widerstand in Ohm.
t	Temperatur in °C.
T	Absolute Temperatur in °C.
u	Umfang des Drahtes in mm.
U	Temperatur der Luft, die den Draht umgibt, in °C.
v	Spezifisches Volumen.
w	Spezifische Wärme.
W	Pro cm^2 Oberfläche abgegebene Wärmemenge in Watt.
W′	Über die ganze Länge des Drahtes abgegebene mittlere Watt/cm^2.
x, x_1, x_2	Durch Abkühlung der Drahtenden bei der Messung hervorgerufene Widerstandserniedrigung in Ohm.
y	Entfernung von der Drahtmitte in cm.
z	Belastungszeit in Sekunden.
Z	Belastungszeit in Minuten.
α	Temperatur-Koeffizient des Widerstandes.
β	Ausdehnungskoeffizient.
ϱ	Spezifischer Widerstand.

Die unter 600°—700° C geltenden Bezeichnungen haben den Index 0, z. B. (C_0, m_0, n_0), die über 600°—700° C geltenden den Index 1, z. B. (C_1, m_1, n_1).

E. LITERATURVERZEICHNIS.

Bijlevelt, J. S. van: „Die künstliche Konvektion am elektrischen Hitzdraht". Dissertation T. H., Dresden 1915.

Credner, Fritz: „Über die Veränderungen des galvanischen Widerstandes, welche man beim Ziehen und Tordieren von Drähten und beim Erwärmen gezogener und tordierter Drähte beobachtet; untersucht an Drähten aus Gold, Silber, Kupfer, Nickel und Eisen". Diss. Göttingen 1913.

Emde, Fritz: „Die Erwärmung des drahtförmigen Schmelzeinsatzes". Elektrotechnik und Maschinenbau 1907, 15. Jahrg., S. 455, 478.

Gewecke, Hermann: „Über die Einwirkung der Strukturänderungen auf die physikalischen und elektrischen Eigenschaften von Kupferdrähten und über die Struktur des Kupfers in seinen verschiedenen Behandlungsstadien". Diss. T. H., Darmstadt.

Hennig, F.: „Grundlagen, Methoden und Ergebnisse der Temperaturmessung". Braunschweig 1915.

Hennig, Paul: „Beitrag zur Belastbarkeit von Widerständen in Abhängigkeit von der Zeitdauer der Belastung und von der Temperatursteigerung". E. T. Z. 1925, S. 995.

Klein, Georg: „Beitrag zur Kenntnis von Widerstandsmaterialien". E. T. Z. 1924, S. 300.

Langmuir: „Laws of Heat Transmission". Proc. American Inst El. Engineers, Bd. 3, S. 391.

Langmuir: „Convection and Conduction of Heat in Gases". Physikal Reviev of American Physikal Soc. Bd. 34, Juni 1912. S. 401.

Meyer, Georg J.: „Zur Theorie der Abschmelzsicherungen". München und Berlin 1906.

Niccolai, Guido: „Über den elektrischen Widerstand der Metalle zwischen sehr hohen und sehr tiefen Temperaturen". Physikal. Zeitschr. 1908, Bd. 9, S. 367.

Pirani, M. v.: „Über die Messung der wahren Temperatur von Metallen". Verhandlungen der deutschen physikalischen Gesellschaft, Bd. 12, 1910, S. 301.

Retzow, M.: „Beitrag zum Verhalten eines Widerstandsmaterials bei elektrischer und thermischer Beanspruchung". E. T. Z. 1926, S. 901.

Sieg, E.: „Bestimmung der Erwärmung von Widerständen bei Belastung mit konstanter Stromstärke". E. T. Z. 1925.

Stäblein: „Zusammenhang zwischen Belastungsstromstärke und Temperatur". E. T. Z. 1924, S. 495.

Sturm, Eduard: „Über die Veränderlichkeit des spezifischen Gewichtes". Diss. Univ. Basel 1905.

Suydam, Vernon A.: „Total radiation from metalls". (Über die Gesamtstrahlung von Metallen.) Physikal Reviev 1915, S. 497.

Wamsler: „Die Wärmeabgabe geheizter Körper an Luft". Forschungsarbeiten Heft 98/99.

White, Walter P.: „Die Konstanz der Thermoelemente". Physikalische Zeitschrift 1907, S. 337.

F. VERZEICHNIS DER ABBILDUNGEN.

1 Lineare Ausdehnung von Aluminium, Eisen, Kupfer, Reinnickel, Silber, Zinn in mm/m.

2 Lineare Ausdehnung von Nickelin in mm/m.

3 Schaltskizze zur Widerstandsmessung.

4a, b Skizzen der Strom- und Spannungszuführung.

5 Ideale Temperaturverteilung längs eines Drahtes.

6 Temperaturverteilung an einem Nickelindrahte. d = 2,00 mm. l = 90,0 cm.

7, 8 Skizzen zur Widerstandsbestimmung.

9 Schaltskizze zur Temperaturmessung mit dem Thermoelement.

10 Eichkurve: Thermoelement Platin-Platinrhodium.

11a, b Eichkurve: Thermoelement Silber-Konstantan.

12 Eichkurve: Thermoelement Kupfer-Konstantan.

13 Skizze der Befestigung des Thermoelementes am Versuchsdrahte.

14 Temperaturverteilung nach langer Glühzeit.

15 Einfluß der Klemmen auf die Temperatur in der Mitte des Drahtes bei verschiedenen Drahtlängen.

16 Erwärmungskurven: Aluminium d = 0,725 mm, d = 0,990 mm.

17 Erwärmungskurven: Aluminium d = 1,510 mm, d = 1,970 mm, d = 2,908 mm.

18 Erwärmungskurven: Eisen d = 0,805 mm, d = 1,020 mm.

19 Erwärmungskurven: Eisen d = 1,519 mm, d = 1,982 mm.

20 Erwärmungskurven: Eisen d = 2,822 mm.

21 Erwärmungskurven: Kupfer d = 0,793 mm, d = 1,000 mm, d = 1,510 mm.

22 Erwärmungskurven: Kupfer d = 2,000 mm.

23 Erwärmungskurven: Nickelin d = 0,600 mm.

24 Erwärmungskurven: Nickelin d = 0,986 mm.

25 Erwärmungskurven: Nickelin d = 2,100 mm, d = 2,524 mm,

26 Erwärmungskurven: Reinnickel d = 0,748 mm, d = 0,998 mm, d = 1,510 mm.

27 Erwärmungskurven: Reinnickel d = 2,990 mm.

28 Erwärmungskurven: Silber d = 0,5012 mm, d = 0,7337 mm. d = 1,0042 mm.

29 Erwärmungskurven: Silber d = 1,4024 mm.

30 Erwärmungskurven: Zinn d = 0,501 mm, d = 0,689 mm, d = 0,920 mm.

31 Erwärmungskurven: Zinn d = 1,591 mm, d = 1,981 mm, d = 3,150 mm.

32 Spezifischer Widerstand von Aluminium, Kupfer, Silber.

33 Spezifischer Widerstand von Eisen.

34 Spezifischer Widerstand von Nickelin, Reinnickel, Zinn.

35 Watt/cm²: Aluminium.

36 Watt/cm²: Eisen.

37 Watt/cm²: Kupfer.

38 Watt/cm²: Nickelin.

39 Watt/cm²: Reinnickel.
40 Watt/cm²: Silber.
41 Watt/cm²: Zinn.
42 C_0 Aluminium.
43 C_0 Eisen, Nickelin, Reinnickel.
44 C_1 Eisen.
45 n_1 Eisen, Kupfer.
46 C_0 Zinn, Silber.
47 C_0 Kupfer.
48 C_1 Kupfer, Reinnickel.
49 C_1 Nickelin.
50 n_1 Nickelin, Reinnickel.
51 Nomogramm: Aluminium: An Luft abgegebene Watt pro cm² Oberfläche.
52 Nomogramm: Aluminium: Belastungsstrom und Beharrungstemperatur.
53 Nomogramm: Eisen: Belastungsstrom und Beharrungstemperatur.
54 Nomogramm: Kupfer: Belastungsstrom und Beharrungstemperatur.
55 Nomogramm: Nickelin: Belastungsstrom und Beharrungstemperatur.
56 Nomogramm: Reinnickel: Belastungsstrom und Beharrungstemperatur.
57 Nomogramm: Silber: Belastungsstrom und Beharrungstemperatur.
58 Nomogramm: Zinn: Belastungsstrom und Beharrungstemperatur.
59 Skizze der Drahtspirale.
60 Einfluß der Oxydation auf den Widerstand eines Kupferdrahtes.
61 Erwärmungskurve eines oxydierten Kupferdrahtes, d = 1,00 mm.
62 Erwärmungskurve eines oxydierten Kupferdrahtes, d = 1,00 mm.
63 Oxydationsverhältnisse an einem Kupferdraht (d = 1,257 mm) bei konstanter Temperatur.

LEBENSLAUF.

Ich wurde am 9. Februar 1903 in Freiwaldau (Tschechoslowakei) als Sohn reichsdeutscher Eltern (Sachsen) geboren. Mein Vater, von Beruf Musterzeichner, ließ mich das Reform-Realgymnasium meiner Heimatstadt besuchen und gab mich nach Ablegung der Reifeprüfung im Herbst 1921, meinem Wunsche gemäß, an die Technische Hochschule Breslau, wo ich mich dem Studium der Elektrotechnik widmete. Am 3. März 1926 legte ich die Diplom-Hauptprüfung mit gutem Erfolge ab.